

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 819 878**

51 Int. Cl.:

**A61B 5/07** (2006.01)  
**A61B 5/03** (2006.01)  
**G01L 9/00** (2006.01)  
**H01L 29/84** (2006.01)  
**A61B 1/04** (2006.01)  
**H01L 29/778** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.03.2017 PCT/IB2017/051322**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **14.09.2017 WO17153908**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.03.2017 E 17719321 (6)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.06.2020 EP 3426147**

54 Título: **Sensor microelectrónico para el diagnóstico intestinal y del tracto digestivo y seguimiento de la motilidad del tracto digestivo**

30 Prioridad:

**10.03.2016 US 201615067093**  
**17.05.2016 US 201615157285**  
**08.09.2016 US 201662384831 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**19.04.2021**

73 Titular/es:

**EPITRONIC HOLDINGS PTE. LTD. (100.0%)**  
**100 Tras Street, Nr. 16-01 100 AM**  
**Singapore 079027, SG**

72 Inventor/es:

**RAM, AYAL**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

ES 2 819 878 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 microelectrónico para el diagnóstico intestinal y del tracto digestivo y seguimiento de la motilidad del tracto digestivo

**Campo técnico**

5 La presente solicitud se refiere al campo de los sensores microelectrónicos y a su uso en el seguimiento de parámetros fisiológicos del cuerpo humano. En particular, la presente solicitud se refiere a transistores pseudoconductores de alta movilidad de electrones de puerta abierta y a su uso en el diagnóstico intestinal y del tracto digestivo y al seguimiento de la motilidad del tracto digestivo.

**Antecedentes**

10 Varios trastornos intestinales y del tracto digestivo, incluyendo el reflujo esofágico, son afecciones bien conocidas y molestas y, por lo general, se expresan como acidez estomacal crónica, y muchas personas la padecen. La acidez estomacal se caracteriza por varios síntomas que incluyen dolor de pecho, indigestión o líquidos de sabor amargo en la garganta o la boca más de dos veces por semana. Estos síntomas crónicos pueden interferir en las actividades diarias y pueden estar asociados con la enfermedad por reflujo gastroesofágico, que puede dañar el esófago y provocar problemas más graves, tales como el crecimiento de tumores que se convierten en neoplasias cancerígenas en el colon, el intestino delgado y el estómago. Estos malignomas causan localmente disfunciones de la peristalsis y la señalización neuronal. Debido a que la enfermedad por reflujo gastroesofágico y otras afecciones esofágicas son difíciles de diagnosticar solo a partir de los síntomas, el control del reflujo y la presión del tracto digestivo puede ser una buena forma para que los médicos evalúen estos síntomas. Al identificar la frecuencia y duración del reflujo, los médicos pueden decidir un tratamiento adecuado. Por lo tanto, el control continuo y en tiempo real del intestino y el tracto digestivo, incluyendo la determinación de la presión del tracto digestivo y la frecuencia y duración del reflujo, son muy importantes.

25 La solución más avanzada del diagnóstico intestinal y del tracto digestivo *in vivo* actual consiste en el uso de dispositivos en cápsulas autónomas para capturar imágenes. Estas cápsulas generalmente contienen una pequeña batería y varias capacidades fotográficas para capturar imágenes del tracto intestinal. Un tipo de tales cápsulas se describe en la Patente de Estados Unidos Núm. 5.604.531. A modo de ejemplo, una cápsula típica tiene una forma alargada y es aproximadamente del tamaño de una cápsula o píldora farmacéutica grande.

30 Después de la deglución, la cápsula autónoma pasa a través del tracto gastrointestinal transmitiendo imágenes a una grabadora montada en un dispositivo similar a un cinturón que utiliza el sujeto. Esta cápsula es capaz de capturar una imagen cada medio segundo y proporciona una solución de diagnóstico en tiempo real a los médicos. Las imágenes se pueden revisar opcionalmente en una fecha posterior. Un ejemplo de tal cápsula es la PILLCAM™ comercializada por Given Imaging Ltd.

35 La presente solicitud es un paso adelante de las cápsulas de formación de imágenes anteriores y sugiere el reemplazo de las capacidades de formación de imágenes de las cápsulas por el control ultrasensible del intestino y el tracto digestivo y la medición de la presión interna dentro del esófago y tanto en el recto como en los esfínteres anales. Esta es una solución no obvia simplemente porque no se han conocido ni descrito cápsulas autónomas de control ciego de este tipo hasta ahora. Para llevar a cabo tales diagnósticos ultrasensibles con las cápsulas de la solicitud, los autores de la presente invención propusieron encapsular los sensores basados en los transistores de alta movilidad de electrones pseudoconductores de GaN/AIGaN en las cápsulas. Esto permitirá a los médicos controlar y realizar un seguimiento del crecimiento de tumores y evaluar las causas del reflujo gástrico, la dificultad para tragar, el tórax funcional, incluyendo otras evaluaciones preoperatorias sin necesidad de imágenes.

45 El transistor de alta movilidad de electrones dopado con polarización (HEMT) es un transistor de efecto de campo (FET) en el que dos capas de banda prohibida y campo de polarización diferentes crecen una sobre la otra formando una estructura de heterounión. Como consecuencia de la discontinuidad en el campo de polarización, se crean cargas superficiales en la interfase entre las capas de la estructura de heterounión. Si la carga superficial inducida es positiva, los electrones tenderán a compensar la carga inducida dando como resultado la formación del canal. Dado que en el HEMT, los electrones del canal están confinados en un pozo cuántico en una región espacial infinitamente estrecha en la interfase entre las capas, estos electrones se denominan gas de electrones bidimensional (2DEG). Este confinamiento especial de los electrones del canal en el pozo cuántico en realidad les otorga características bidimensionales, que mejoran en gran medida su movilidad superando la movilidad general del material en el que fluyen los electrones.

55 Los HEMT basados en las capas de materiales semiconductores III-V, tales como el nitruro de galio (GaN) y el nitruro de aluminio y galio (AIGaN), se han desarrollado recientemente con vistas a aplicaciones de conmutación de alta tensión y alta potencia. Las altas tensiones y las altas velocidades de conmutación permiten la fabricación de dispositivos más pequeños y eficaces, por ejemplo, en electrodomésticos, comunicaciones y automóviles. Para controlar la densidad de electrones en el canal 2DEG y para conectar y desconectar el HEMT, se debe regular la

tensión en la puerta del transistor.

Las Fig. 1a-1c muestran esquemáticamente el pozo cuántico en tres condiciones de polarización diferentes a partir del potencial de puerta positivo ( $V_G$ ), mucho más alto que la tensión umbral ( $V_T$ ), y bajando hasta el potencial de puerta 0V y más allá de los valores negativos por debajo de la tensión umbral. La  $V_T$  se define como la tensión requerida para poblar de electrones la interfase entre las capas de GaN y AlGa<sub>N</sub>, creando así la conductividad del canal 2DEG. Dado que los electrones del canal 2DEG ocupan niveles de energía por debajo del nivel de Fermi, el nivel de Fermi en un pozo cuántico se encuentra por encima de varios niveles de energía cuando  $V_G \gg V_T$  (Fig. 1a). Esto permite una alta población de electrones del canal 2DEG y, por tanto, una alta conductividad. En este caso, el HEMT está activado. Sin embargo, cuando  $V_G$  disminuye a 0V (Fig. 1b), el nivel de Fermi también desciende con respecto al pozo cuántico. Como resultado, se pueblan niveles de energía con muchos menos electrones y la cantidad de electrones del canal 2DEG disminuye significativamente. Cuando  $V_G \ll V_T$  (Fig. 3c), todos los niveles de energía de los electrones están por encima del nivel de Fermi y no hay electrones 2DEG por debajo de la puerta. Esta situación se denomina "agotamiento del canal" y el HEMT está desactivado.

Muchas estructuras HEMT basadas en AlGa<sub>N</sub>/GaN disponibles comercialmente tienen una  $V_T$  negativa, lo que da como resultado un modo de operación "normalmente encendido" a un potencial de puerta de 0V. Se denominan "transistores en modo de agotamiento" y se utilizan en varias aplicaciones de conmutación de potencia cuando se debe aplicar tensión negativa en la puerta para bloquear la corriente. Sin embargo, para un funcionamiento seguro a alta tensión o alta densidad de potencia, para reducir la complejidad del circuito y eliminar el consumo de energía en espera, se prefieren los HEMT con características de "normalmente apagado".

Se ha informado sobre varias técnicas para fabricar los HEMT normalmente apagados. Burnham *et al* (2010) propusieron estructuras normalmente apagadas del tipo puerta empotrada. En esta estructura, la capa barrera de AlGa<sub>N</sub> se graba al ácido y la puerta se acerca a la interfase entre la capa barrera de AlGa<sub>N</sub> y la capa de amortiguación de GaN. Cuando la puerta se acerca a la interfase entre las capas, la  $V_T$  aumenta. El funcionamiento normalmente apagado del transistor se logra una vez que la región de agotamiento alcanza la interfase y agota el canal 2DEG a una tensión de puerta cero. Las principales ventajas de estos HEMT son un consumo de energía relativamente menor, menos ruido y circuitos de control más simples. Estos HEMT se utilizan actualmente, por ejemplo, en comunicaciones, imágenes y radares de microondas y ondas milimétricas.

Chang *et al* (2009) propusieron en lugar de grabar al ácido la capa barrera relativamente gruesa para acercarse a la interfase de AlGa<sub>N</sub>/GaN, utilizar una barrera de AlGa<sub>N</sub> muy delgada. Esta estructura también logra un funcionamiento normalmente apagado acercando la puerta hacia la interfase de AlGa<sub>N</sub>/GaN. Chen *et al* (2010) propusieron utilizar el método de tratamiento con plasma a base de flúor. Aunque muchas publicaciones han adoptado varios métodos para lograr dispositivos normalmente apagados con un impacto mínimo en la corriente de drenaje, lamentablemente sacrifican el funcionamiento de activación del dispositivo.

El documento US 20110152639 A1 (de Smart Pill Corporation, 2010) describe un dispositivo de tipo cápsula ingerible para controlar un parámetro fisiológico de un tracto gastrointestinal y que comprende un transistor de tipo ISFET sensible a la carga para la detección de potenciales de tejido del tracto digestivo creados a partir de señales neuronales o de potenciales de tejido peristáltico muscular, y un sensor piezoeléctrico sensible a la presión.

El documento US 20110137184 A1 (de la Fundación de Investigación de la Universidad de Florida, 2009) se refiere a un transistor de alta movilidad de electrones (HEMT) que comprende una película biocompatible piezoeléctrica en una región de puerta y capaz de funcionar como un sensor de presión implantable.

El documento KR 100 856 460 B1 (de Mahn Hee Kang, 2007) proporciona un módulo sensor de presión y un dispositivo médico de tipo cápsula que comprende este módulo sensor para medir el potencial de hidrógeno al aislar un electrodo de referencia de un líquido que se debe medir.

El documento US 4.965.697 A (Schlumberger SA, 1989) describe un sensor de presión hidrostática de estado sólido basado en un transistor de tipo HEMT elaborado a partir de arseniuro de aluminio y galio (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As).

### Compendio

La presente solicitud describe realizaciones de un método para controlar parámetros fisiológicos de un sujeto humano utilizando un sensor microelectrónico basado en un transistor de movilidad de electrones de alta conductividad pseudoconductor de puerta abierta (PC-HEMT). En algunas realizaciones, el transistor comprende un sustrato, sobre el cual se deposita una estructura de heterounión multicapa. Esta estructura de heterounión puede comprender al menos dos capas, una capa de amortiguación y una capa barrera, que se hacen crecer a partir de materiales semiconductores monocristalinos o policristalinos III-V.

Un canal conductor que comprende un gas de electrones bidimensional (2DEG), en el caso de una configuración de dos capas, o un gas de huecos bidimensional (2DHG), en el caso de una configuración de tres capas, se forma en la interfase entre las capas de amortiguación y de barrera y proporciona corriente de electrones o huecos en el sistema entre los electrodos fuente y de drenaje. Los contactos de fuente y drenaje, ya sean óhmicos o capacitivamente acoplados (no óhmicos) están conectados al canal 2DEG/2DHG formado y a metalizaciones eléctricas, estas últimas

se colocan en la parte superior del transistor y lo conectan al sistema sensor. Se deposita una capa dieléctrica opcional encima de la estructura de heterounión. El área de puerta abierta del transistor se forma entre las áreas de fuente y drenaje como resultado del empotramiento o crecimiento de la capa superior a un espesor específico.

5 Si los contactos de fuente y drenaje no son óhmicos (acoplados capacitivamente), para contactar eléctricamente el canal 2DEG/2DHG inferior, que está aproximadamente 5-20 nm por debajo de las metalizaciones, se utiliza el régimen de frecuencia de CA. El acoplamiento capacitivo de los contactos metálicos no óhmicos con el canal 2DEG/2DHG se induce normalmente a una frecuencia superior a 30 kHz. En el caso de contactos no óhmicos, la lectura de CC no se puede realizar. En su lugar, se realizan la lectura de CA o las mediciones de impedancia de la corriente eléctrica que fluye a través del canal 2DEG/2DHG.

10 En algunas realizaciones, las características importantes de la estructura PC-HEMT son las siguientes:

(i) el espesor de la capa superior en el área de puerta abierta entre los contactos de fuente y drenaje es de 5-9 nm, preferiblemente de 6-7 nm, más preferiblemente de 6,3 nm, y eso corresponde al rango de corriente pseudoconductora entre el modo de funcionamiento normalmente encendido y normalmente apagado del transistor,

15 (ii) la superficie de la capa superior dentro del área de puerta abierta entre los contactos de fuente y drenaje tiene una rugosidad de aproximadamente 0,2 nm o menos, preferiblemente de 0,1 nm o menos, más preferiblemente de 0,05 nm, y

(iii) los contactos de la fuente no óhmica y el drenaje para el acoplamiento capacitivo con el canal conductor 2DEG/2DHG opcionalmente reemplazan los contactos óhmicos.

20 En algunas realizaciones, la estructura de heterounión multicapa PC-HEMT de la presente solicitud se hace crecer a partir de cualquier material semiconductor monocristalino o policristalino III-V disponible, tal como GaN/AlGaIn, GaN/AlN, GaN/InN, GaN/InAlGaIn, GaAs/AlGaAs, GaN/InAlN, InN/InAlN y LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub>. En el caso del PC-HEMT de GaN/AlGaIn, se ha descubierto sorprendentemente que en el área de puerta abierta del PC-HEMT, el espesor de la capa superior que corresponde al rango de corriente pseudoconductora entre el modo de funcionamiento normalmente encendido y normalmente apagado del PC-HEMT, es de aproximadamente 6-7 nm.

25 En una realización particular, la estructura de heterounión puede ser una estructura de tres capas que consiste en dos capas de amortiguación y una capa barrera comprimida entre dichas capas de amortiguación como en un sándwich. Esto puede conducir a la formación del gas de huecos bidimensional (2DHG) en la capa de amortiguación superior por encima de la capa barrera, lo que da como resultado la inversión de la polaridad del transistor.

30 En algunas realizaciones, la estructura de heterounión se coloca sobre una membrana autoportante que proporciona un efecto de carga de masa adicional sobre la superficie del sensor y permite un modo de control de la presión del sensor. En algunas realizaciones, la presente solicitud proporciona el sensor microelectrónico basado en PC-HEMT para un diagnóstico intestinal y del tracto digestivo y un seguimiento de la motilidad del tracto digestivo en forma de cápsula o píldora ingerible.

35 Varias realizaciones pueden permitir diversos beneficios y se pueden utilizar junto con diversas aplicaciones. Los detalles de una o más realizaciones se establecen en las figuras adjuntas y la descripción a continuación. Otras características, objetos y ventajas de las técnicas descritas resultarán evidentes a partir de la descripción y los dibujos y de las reivindicaciones.

### Breve descripción de los dibujos

40 Las realizaciones descritas se entenderán y apreciarán más completamente a partir de la siguiente descripción detallada tomada junto con las figuras adjuntas.

La Fig. 1 ilustra una teoría detrás de la formación de 2DEG (neutralidad de carga combinada con el nivel de energía más bajo) en la discontinuidad de la banda de conducción y muestra esquemáticamente el pozo cuántico en tres condiciones de polarización diferentes:

45 La Figura 1a muestra el potencial de puerta positivo (+V<sub>G</sub>), mucho más alto que la tensión umbral (V<sub>T</sub>),

La Figura 1b muestra el potencial de puerta cero, y

La Figura 1c muestra el potencial de puerta negativo (-V<sub>G</sub>) por debajo de la tensión umbral (V<sub>T</sub>).

50 La Fig. 2 muestra esquemáticamente la dependencia de la corriente fuente-drenaje (una densidad de portador de carga) inducida dentro del canal 2DEG de un HEMT de GaN/AlGaIn del espesor de la capa barrera de AlGaIn empotrada en el área de puerta abierta.

La Fig. 3 ilustra una teoría detrás de la formación de 2DEG (neutralidad de carga combinada con el nivel de energía más bajo) en la discontinuidad de la banda de conducción.

La Fig. 4a muestra esquemáticamente una vista en sección transversal lateral (XZ) del PC-HEMT de una realización sin una capa dieléctrica.

La Fig. 4b muestra esquemáticamente una vista en sección transversal superior (XY) del PC-HEMT de una realización sin una capa dieléctrica.

5 La Fig. 4c muestra esquemáticamente una vista en sección transversal del PC-HEMT de una realización con una capa dieléctrica.

La Figura 5a muestra esquemáticamente la formación de los canales conductores 2DEG y 2DHG en la estructura PC-HEMT de tres capas GaN/AlGaIn/GaN de la cara de Ga.

10 La Figura 5b muestra esquemáticamente la formación de los canales conductores 2DEG y 2DHG en la estructura PC-HEMT de tres capas GaN/AlGaIn/GaN de la cara N.

La Fig. 6 muestra esquemáticamente la formación del canal conductor 2DEG en la estructura PC-HEMT de tres capas Ga/AlGaIn/GaN de la cara N con una capa ultrafina de Al(GaN)N para un mejor confinamiento.

La Fig. 7a muestra esquemáticamente una vista en sección transversal del PC-HEMT de una realización con contactos de fuente y drenaje no óhmicos acoplados capacitivamente y sin una capa dieléctrica.

15 La Fig. 7b muestra esquemáticamente una vista en sección transversal del PC-HEMT de una realización con contactos de fuente y drenaje no óhmicos acoplados capacitivamente y con una capa dieléctrica.

La Fig. 7c muestra esquemáticamente una vista en sección transversal del PC-HEMT de una realización con áreas de la fuente y el drenaje altamente dopadas.

20 La Fig. 8a muestra esquemáticamente la interfase de la capa barrera de AlGaIn/líquido con la formación de doble capa, circuito de interfase equivalente simplificado y electrodinámica de iones durante la exposición del sensor de una realización a una carga positiva.

La Fig. 8b muestra esquemáticamente la interfase de la capa barrera de AlGaIn/líquido con la formación de doble capa, circuito de interfase equivalente simplificado y electrodinámica de iones durante la exposición del sensor a una carga negativa.

25 La Fig. 9a muestra esquemáticamente una vista en sección transversal del PC-HEMT de una realización con membranas autoportantes.

La Fig. 9b ilustra una situación en la que se aplica la presión externa (efecto de masa) sobre el sensor que incorpora el PC-HEMT de la Fig. 8a, y se transfiere a una tensión interna modificada causada por la flexión.

30 La Fig. 10a muestra esquemáticamente un diseño de la cápsula autónoma para el control *in vivo* de un intestino y un tracto digestivo.

La Fig. 10b muestra esquemáticamente un diseño de la cápsula autónoma con un módulo de comunicación digital de campo cercano (NFC) de potencia cero para el control *in vivo* de un intestino y un tracto digestivo.

35 La Fig. 10c muestra esquemáticamente un diseño de la cápsula autónoma con un módulo de comunicación digital de campo cercano (NFC) alimentado por batería para el control *in vivo* de un intestino y un tracto digestivo.

La Fig. 11 ilustra cómo los PC-HEMT sensibles a la presión instalados dentro de la cápsula de una realización reaccionan a cualquier movimiento físico del tejido del tracto digestivo provocando pequeñas  $\mu$ -variaciones locales de la presión del líquido (en el intervalo de sólo unos pocos pascales).

40 La Fig. 12 ilustra la acción de los PC-HEMT sensibles a la carga que detectan los cambios más pequeños en los potenciales del tejido del tracto digestivo creados a partir de la señalización neuronal o los movimientos del tejido peristáltico muscular.

La Fig. 13 ilustra el movimiento de la cápsula de una realización a lo largo del intestino y el tracto digestivo con un movimiento de bombeo peristáltico del tracto digestivo, y la neuroestimulación óptica de las células del tejido del tracto digestivo.

45 La Fig. 14 muestra la configuración del sensor experimental basado en PC-HEMT para el diagnóstico de tumores en el tracto digestivo en ratones.

La Fig. 15 muestra esquemáticamente la configuración del sensor basado en PC-HEMT de la Fig. 14.

La Figura 16a muestra los resultados de las mediciones no invasivas de un solo punto de un tracto digestivo de ratón sin suministro de medicamento.

La Figura 16b muestra los resultados de las mediciones no invasivas de un solo punto de un tracto digestivo de ratón con un suministro de medicamento.

La Figura 17a muestra dos espectros de Fourier registrados con el sensor basado en PC-HEMT de una realización del tracto digestivo de un ratón sin los medicamentos añadidos.

5 La Figura 17b muestra los espectros de Fourier registrados con el sensor basado en PC-HEMT de una realización con la adición de nifedipina y lidocaína para la desactivación de la actividad muscular y neuronal.

### Descripción detallada

10 En la siguiente descripción, se describirán varios aspectos de la presente solicitud. Para fines explicativos, se establecen configuraciones y detalles específicos para proporcionar una comprensión completa de la presente solicitud. Sin embargo, también resultará evidente para un experto en la técnica que la presente solicitud se puede poner en práctica sin los detalles específicos presentados en la presente memoria. Además, se pueden omitir o simplificar características bien conocidas para no complicar la presente solicitud.

15 El término "que comprende", utilizado en las reivindicaciones, no se debe interpretar como restringido a los medios enumerados a continuación; no excluye otros elementos o etapas. Se debe interpretar como una especificación de la presencia de las características, números enteros, etapas o componentes indicados a los que se hace referencia, pero no excluye la presencia o adición de una o más características, números enteros, etapas o componentes o grupos diferentes de los mismos. Por tanto, el alcance de la expresión "un dispositivo que comprende x y z" no debería limitarse a dispositivos que constan únicamente de los componentes x y z. Como se emplea en la presente memoria, el término "aproximadamente" significa que hay una tolerancia de 10% del valor mencionado o reivindicado. Como se emplea en la presente memoria, el término "y/o" incluye todas y cada una de las combinaciones de uno o más de los elementos enumerados asociados. A menos que se defina lo contrario, todos los términos (incluyendo los términos técnicos y científicos) utilizados en la presente memoria tienen el mismo significado que el que entiende comúnmente un experto en la técnica a la que pertenece esta invención. Se entenderá adicionalmente que los términos, tales como los definidos en los diccionarios de uso común, deben interpretarse como si tuvieran un significado que fuera coherente con su significado en el contexto de la memoria descriptiva y la técnica relevante y no deben interpretarse de una manera idealizada o demasiado formal a menos que se defina expresamente en la presente memoria. Es posible que las funciones o construcciones conocidas no se describan en detalle por razones de brevedad y/o claridad.

20 Se entenderá que cuando se hace referencia a un elemento como "sobre", "fijado a", "conectado a", "acoplado con", "contactando", etc., otro elemento, éste puede estar directamente sobre, fijado a, conectado a, acoplado con o en contacto con el otro elemento o también pueden estar presentes elementos intermedios. Por el contrario, cuando se dice que un elemento está, por ejemplo, "directamente sobre", "directamente fijado a", "directamente conectado a", "directamente acoplado con" o "directamente en contacto con" otro elemento, no hay elementos intermedios. Los expertos en la técnica también apreciarán que las referencias a una estructura o característica que está dispuesta "adyacente" a otra característica pueden tener partes que se superponen o subyacen a la característica adyacente.

25 En resumen, el principio de funcionamiento del sensor PC-HEMT se basa en una sensibilidad de carga ultra alta en la superficie del sensor, como se describe en detalle en las solicitudes de patente en tramitación con la presente, U.S. 15/067.093 y U.S. 15/157.285, de las cuales la presente solicitud reclama prioridad. Por ejemplo, un intestino o un tracto digestivo representan físicamente una fuente de volumen de un campo de dipolo eléctrico que actúa dentro de un conductor electrolítico de volumen representado por el cuerpo humano. Utilizando la sensibilidad de carga enormemente alta, es posible registrar el movimiento del intestino y el tracto digestivo como una cierta onda (distribución dinámica) de un ciclo de carga en la superficie del sensor.

30 La **Fig. 2** muestra la dependencia de la corriente de fuente-drenaje (una densidad del portador de carga) del espesor de la capa barrera empotrada. Como se observa en el gráfico, las estructuras que tienen un espesor de la capa barrera superior a 9 nm forman canales 2DEG normalmente conectados. En tales estructuras, debido a los efectos de polarización inherentes presentes en los materiales III-V, se induce una delgada lámina de cargas en la parte superior e inferior de las interfases de la capa barrera. Como resultado, se induce un campo eléctrico elevado en la capa barrera y los estados donantes de superficie en la interfase superior comienzan a donar electrones para formar el canal 2DEG en la proximidad de la interfase de heterounión sin la aplicación de una polarización de puerta. Por lo tanto, estas estructuras constituyen dispositivos normalmente encendidos. Por el contrario, las estructuras que tienen un espesor de la capa barrera inferior a aproximadamente 5 nm constituyen dispositivos normalmente apagados.

35 La capa barrera empotrada o crecida a 5-9 nm está optimizada para mejorar significativamente la sensibilidad del sensor. Este espesor de la capa barrera corresponde al rango de corriente "pseudoconductora" entre los modos de funcionamiento normalmente encendido y normalmente apagado del canal 2DEG y requiere una explicación adicional.

El rango de corriente de "pseudocontacto" del canal 2DEG se define como un rango de funcionamiento del canal entre sus modos de funcionamiento normalmente encendido y normalmente apagado. Los "estados de trampa" son

estados en la banda prohibida de un semiconductor que atrapan un portador hasta que se recombina. Los "estados de superficie" son estados causados por la reconstrucción de la superficie del cristal local debido a la tensión superficial causada por algunos defectos del cristal, dislocaciones o la presencia de impurezas. Tal reconstrucción de superficie a menudo crea "estados de trampa de superficie" correspondientes a una velocidad de recombinación de superficie. La clasificación de los estados de trampa de superficie depende de la posición relativa de su nivel de energía dentro de la banda prohibida. Los estados de trampa de superficie con energía por encima del nivel de Fermi son similares a los de un aceptor, alcanzando una carga negativa cuando están ocupados. Sin embargo, los estados de trampa de superficie con energía por debajo del nivel de Fermi son similares a los de un donador, cargados positivamente cuando están vacíos y neutros cuando están ocupados. Estos estados de trampa de superficie de tipo donador se consideran la fuente de electrones en la formación del canal 2DEG. Pueden poseer una amplia distribución de energías de ionización dentro de la banda prohibida y son causados por reacciones redox, enlaces colgantes y vacíos en la capa superficial. Siempre existe un equilibrio entre la densidad del canal 2DEG y el número de donadores de superficie ionizada que se rige por la neutralidad de carga y la continuidad del campo eléctrico en las interfases.

Por tanto, las trampas superficiales de tipo donador en la superficie de la capa barrera son una de las fuentes más importantes de 2DEG en el canal. Sin embargo, esto solo se aplica a un espesor de capa barrera específico. En una capa barrera relativamente delgada, el estado de trampa de superficie está por debajo del nivel de Fermi. Sin embargo, a medida que aumenta el espesor de la capa barrera, la energía del estado de trampa de superficie se acerca a la energía de Fermi hasta que coincide con ella. El espesor de la capa barrera correspondiente a tal situación se define como "crítico". En este punto, los electrones que llenan el estado de trampa de superficie son atraídos hacia el canal por el fuerte campo eléctrico inducido por polarización que se encuentra en la barrera para formar el 2DEG instantáneamente.

Si los estados de trampa de superficie están completamente agotados, un mayor aumento en el espesor de la capa barrera no aumentará la densidad de 2DEG. En realidad, si la capa del canal 2DEG no logra estirar la capa barrera, la última simplemente se relajará. Tras la relajación de la capa barrera, se crean muchos defectos cristalinos en la interfase entre las capas de amortiguación y barrera, y la polarización piezoeléctrica desaparece instantáneamente provocando un deterioro en la densidad de 2DEG.

Para ilustrar el fenómeno anterior de la corriente pseudoconductor, se hace referencia ahora a la **Fig. 3**. El equilibrio de energía entre los estados de trampa de la superficie donadora y la barrera del túnel de AlGa<sub>N</sub> conduce a la formación de 2DEG (neutralidad de carga combinada con el nivel de energía más bajo) en la discontinuidad de la banda de conducción. Como se muestra más arriba, la disminución del espesor de la capa barrera da como resultado un aumento de la barrera de energía. Como resultado, los estados de trampa de superficie de tipo donador ionizable, que son responsables del túnel de electrones desde la superficie a 2DEG, se desplazan por debajo del nivel de Fermi, minimizando así el suministro de electrones al canal 2DEG. Esta situación teórica se muestra en la **Fig. 3**. Por lo tanto, el empotramiento de la capa de AlGa<sub>N</sub> de 9 nm a 5 nm conduce a una gran caída en la conductividad del gas de electrones bidimensional de seis órdenes de magnitud.

Por tanto, el mecanismo del agotamiento de 2DEG basado en el empotramiento de la capa barrera depende en gran medida de los estados de trampa de superficie de tipo donador (o carga de superficie total). A medida que el espesor de la capa barrera disminuye, se necesita menos carga externa adicional para aplicar a la superficie de la capa barrera para agotar el canal 2DEG. Existe un espesor de barrera crítico (el más pequeño), cuando el canal 2DEG está en su mayor parte agotado pero sigue siendo altamente conductor debido a una combinación de la barrera de energía y la energía de los estados de trampa de la superficie donadora. En este espesor crítico, incluso el cambio de energía más pequeño en la superficie a través de cualquier influencia externa, por ejemplo, una onda acústica que se propaga a lo largo de la superficie, conduce inmediatamente a un agotamiento muy fuerte de 2DEG. Como resultado, la superficie de la capa barrera en este espesor crítico es extremadamente sensible a cualquier cambio mínimo en el campo eléctrico del entorno.

A la luz de lo anterior, es posible concluir que el empotramiento de la capa barrera de 9 nm a 5 nm reduciría significativamente la densidad 2DEG, llevaría el sensor al funcionamiento de "umbral cercano" y diera como resultado un gran aumento de la sensibilidad de carga superficial. El espesor específico de 5-9 nm de la capa barrera responsable del comportamiento pseudoconductor del canal 2DEG le proporciona al sensor una sensibilidad increíble.

Por tanto, además del espesor de la capa superior empotrada, la rugosidad de la superficie de la capa es otro parámetro muy importante que no se ha descrito previamente. Se ha descubierto sorprendentemente que la rugosidad de la superficie de la capa superior por debajo de 0,2 nm evita la dispersión de los estados de trampa de superficie de tipo donador. Por lo tanto, la combinación de estas dos características: un espesor de 5-9 nm de la capa superior y una rugosidad muy reducida de su superficie hacen que el sensor sea increíblemente sensible.

En una realización, las **Fig. 4a** y **4b** muestran dos vistas en sección transversal (lateral y superior) de la configuración PC-HEMT de la presente solicitud que comprende:

- una estructura de heterounión multicapa elaborada a partir de materiales semiconductores monocristalinos o

policristalinos III-V, comprendiendo dicha estructura una capa de amortiguación (11) y una capa barrera superior (12), y que se deposita sobre una capa sustrato (10);

▪ un canal conductor de gas de electrones bidimensional (2DEG) (13) formado en la interfase entre dicha capa de amortiguación (11) y dicha capa barrera superior (12) y que proporciona corriente de electrones en dicho transistor entre los contactos óhmicos de la fuente y el drenaje (15);

▪ los contactos óhmicos de la fuente y el drenaje (15) conectados a dicho canal conductor 2DEG (13) y a metalizaciones eléctricas (14) para conectar dicho transistor a un circuito eléctrico; y

▪ un área de puerta abierta (17) entre dichos contactos óhmicos de la fuente y el drenaje (15);

en donde:

(i) el espesor (d) de dicha capa barrera (12) en dicha área de puerta abierta (17) está en el rango de 5-9 nm, que corresponde al rango de corriente pseudoconductor entre el modo de funcionamiento normalmente encendido y normalmente apagado del transistor, y

(ii) la superficie de dicha capa barrera (12) tiene una rugosidad de aproximadamente 0,2 nm o menos.

El mismo transistor que en las Fig. 4a y 4b, pero que comprende adicionalmente una capa dieléctrica (16) depositada encima de dicha capa barrera (12), se muestra esquemáticamente en la **Figura 4c**. La capa dieléctrica opcional (16), que se utiliza para la pasivación del dispositivo, está elaborada, por ejemplo, a partir de una pila de SiO-SiN-SiO ("ONO") de 100-100-100 nm de espesor o una pila de SiN-SiO-SiN ("NON") que tiene los mismos espesores. Esta capa dieléctrica (16) se deposita sobre la parte superior de la capa barrera mediante un método de depósito químico en fase de vapor mejorado con plasma (PECVD), que es una técnica de depósito libre de estrés.

Las metalizaciones eléctricas (14) conectan el PC-HEMT al circuito eléctrico y permiten el flujo de corriente eléctrica entre los contactos óhmicos (15). Las metalizaciones eléctricas (14) están elaboradas a partir de pilas metálicas, tales como Cr/Au, Ti/Au, Ti/W, Cr/Al y Ti/Al. Las capas de Cr o Ti de la pila metálica tienen, por ejemplo, un espesor de 5-10 nm, mientras que la segunda capa de metal, tal como Au, W y Al, tiene un espesor de 100-400 nm. Las metalizaciones eléctricas se eligen de acuerdo con la tecnología establecida y la línea de ensamblaje en una instalación de fabricación de sala limpia en particular. En otra realización más, los contactos óhmicos de la fuente y el drenaje (15) están elaborados a partir de pilas metálicas, tales como Ti/Al/Mo/Au, Ti/Al/Ni/Au, Ti/Au y Ti/W que tienen 15-50 nm de espesor.

En otra realización adicional más, la capa sustrato (10) comprende un material adecuado para formar la capa barrera y está compuesta, por ejemplo, de zafiro, silicio, carburo de silicio, nitruro de galio o nitruro de aluminio. La estructura de heterounión (11,12) se deposita sobre la capa sustrato (10), por ejemplo, mediante un método de depósito químico en fase de vapor metalorgánico (MOCVD), y forma un canal de gas de electrones bidimensional (2DEG) (13) en las proximidades de la interfase entre la capa de amortiguación (11) y la capa barrera (12). A continuación, la capa barrera (12) se puede empotrar o hacer crecer como una capa delgada entre los contactos óhmicos (15), formando así un área de puerta abierta.

En un aspecto adicional, la estructura de heterounión puede ser una estructura de tres capas que consiste en dos capas de amortiguación y una capa barrera comprimida entre dichas capas de amortiguación como en un sándwich, en donde la capa superior es una capa de amortiguación. Esto puede conducir a la formación del gas de huecos bidimensional (2DHG) en la capa de amortiguación superior por encima de la capa barrera, lo que da como resultado una polaridad inversa del transistor en comparación con la estructura de dos capas descrita anteriormente.

En general, la polaridad de los materiales semiconductores de nitruro III-V afecta fuertemente al rendimiento de los transistores basados en estos semiconductores. La calidad de los materiales de GaN tipo wurtzita puede variar según su polaridad, porque tanto la incorporación de impurezas como la formación de defectos están relacionadas con el mecanismo de crecimiento, que a su vez depende de la polaridad de la superficie. La aparición de 2DEG/2DHG y las propiedades ópticas de las estructuras de heterounión de materiales basados en nitruros están influenciadas por los efectos de campo interno causados por polarizaciones espontáneas y piezoelectricas. Los dispositivos de todos los materiales de nitruro III-V se fabrican sobre superficies polares {0001}. En consecuencia, sus características dependen de si las capas de amortiguación de GaN muestran polaridad positiva de la cara de Ga o polaridad negativa de la cara N. Por lo tanto, como resultado de la polaridad de los materiales de GaN tipo wurtzita, cualquier capa de GaN tiene dos superficies con diferentes polaridades, una superficie polar de Ga y una superficie polar de N. Una superficie polar de Ga se define en la presente memoria como una superficie que termina en una capa de átomos de Ga, cada uno de los cuales tiene un enlace no ocupado normal a la superficie. Cada átomo de Ga de la superficie está unido a tres átomos de N en la dirección que se aleja de la superficie. Por el contrario, una superficie polar N se define como una superficie que termina en una capa de átomos de N, cada uno de los cuales tiene un enlace no ocupado normal a la superficie. Cada átomo de N de la superficie también está unido a tres átomos de Ga en la dirección que se aleja de la superficie. Por tanto, las estructuras de polaridad de la cara N tienen la polaridad inversa a las estructuras de polaridad de la cara de Ga.

Como se describió anteriormente para la estructura de heterounión de dos capas, la capa barrera siempre se coloca encima de la capa de amortiguación. Por tanto, la capa que se empotra es la capa barrera, concretamente la capa de AlGaIn. Como resultado, dado que el 2DEG se utiliza como canal conductor y este canal conductor está ubicado ligeramente por debajo de la capa barrera (en una región más gruesa de la capa de amortiguación de GaN), la estructura de heterounión crece a lo largo de la dirección  $\{0001\}$  o, en otras palabras, con la polaridad de la cara de Ga. Sin embargo, como se explicó anteriormente, el mecanismo físico que conduce a la formación del 2DEG es una discontinuidad de polarización en la interfase AlGaIn/GaN, reflejada por la formación de las cargas de interfase fija inducidas por polarización que atraen a los portadores libres para formar un gas portador bidimensional. Es una carga de polarización positiva en la interfase AlGaIn/GaN que atrae electrones para formar 2DEG en la capa de GaN ligeramente por debajo de esta interfase.

Como se señaló anteriormente, la polaridad de las cargas de la interfase depende de la orientación de la red cristalina de la estructura de la heterounión, es decir, la polaridad de la cara de Ga frente a la de la cara N, y la posición de la interfase AlGaIn/GaN respectiva en la estructura de la heterounión (arriba o debajo de la interfase). Por tanto, pueden estar presentes diferentes tipos de portadores acumulados en la estructura de heterounión de las realizaciones.

En el caso de la estructura de heterounión de tres capas, hay cuatro configuraciones posibles:

#### ***Polaridad de la cara de Ga***

1) La polaridad de la cara de Ga se caracteriza por la formación de 2DEG en la capa de GaN debajo de la capa barrera de AlGaIn. Esta es en realidad la misma configuración de dos capas descrita anteriormente, pero con la adición de la capa superior de GaN. En esta configuración, la capa barrera de AlGaIn y dos capas de amortiguación de GaN deben estar nominalmente sin dopar o con dopaje de tipo n.

2) En otra configuración de la cara de Ga mostrada en **Fig. 5a**, para formar el canal conductor que comprende un gas de huecos bidimensional (2DHG) en la capa superior de GaN por encima de la capa barrera de AlGaIn en la configuración, la capa barrera de AlGaIn debe ser dopada de tipo p (por ejemplo, con Mg o Be como aceptor) y la capa de amortiguación de GaN debe tener también dopaje de tipo p con Mg, Be o intrínseco.

#### ***Polaridad de la cara N***

3) La polaridad de la cara N se caracteriza por la formación de 2DEG en la capa superior de GaN por encima de la capa barrera de AlGaIn, como se muestra en **Fig. 5b**. En este caso, la capa barrera de AlGaIn y dos capas de amortiguación de GaN deben estar nominalmente sin dopar o con dopaje de tipo n.

4) La última configuración supone que el canal conductor 2DHG se forma en la capa de amortiguación de GaN debajo de la capa barrera de AlGaIn. La capa superior de GaN puede estar presente (estructura de tres capas) o no (estructura de dos capas) en este caso. La capa barrera de AlGaIn debe tener dopaje de tipo p (por ejemplo, con Mg o Be como aceptor) y la capa inferior de GaN también debe tener dopaje de tipo p con Mg, Be o intrínseco.

Por lo tanto, hay cuatro estructuras de tres capas de heterounión implementadas en el transistor de las realizaciones, basadas en las configuraciones anteriores:

A. Cara Ga Heteroestructura GaN/AlGaIn/GaN con el 2DEG formado en la capa de amortiguación de GaN debajo de la capa barrera de AlGaIn. En este caso, la capa superior de GaN se puede omitir para obtener la estructura de dos capas. Para la estructura de tres capas, la capa superior de GaN se debe empotrar a un espesor de 1-9 nm en el área de puerta abierta o crecer con este bajo espesor, con una rugosidad por debajo de 0,2 nm, y el espesor de la barrera de AlGaIn se puede ajustar correctamente durante el crecimiento.

B. Cara Ga Heteroestructura de GaN/AlGaIn/GaN con el canal conductor 2DHG formado en la capa superior de GaN por encima de la capa barrera de AlGaIn. La capa superior de GaN se debe empotrar a un espesor de 5-9 nm en el área de puerta abierta con una rugosidad inferior a 0,2 nm, y el espesor de la capa barrera de AlGaIn se puede ajustar correctamente. Las concentraciones de dopaje de tipo P de la capa de GaN y la barrera de AlGaIn se deben ajustar; el 2DHG debe ser contactado (en el caso ideal por contactos óhmicos).

C. Cara N Heteroestructura de GaN/AlGaIn/GaN con el 2DEG en la capa superior de GaN por encima de la capa barrera de AlGaIn. La capa superior de GaN se debe empotrar a un espesor de 5-9 nm en el área de puerta abierta con una rugosidad inferior a 0,2 nm. El espesor de la barrera de AlGaIn se puede ajustar durante el crecimiento. Se deben ajustar los niveles de dopaje de tipo N de la capa de amortiguación de GaN y la capa barrera de AlGaIn; el 2DEG tiene que ser contactado (en el caso ideal por contactos óhmicos).

D. Cara N Heteroestructura de GaN/AlGaIn/GaN con 2DHG en la capa de amortiguación de GaN debajo de la capa barrera de AlGaIn. En este caso, la capa superior de GaN se puede omitir para obtener la estructura de dos capas. En ambas, las configuraciones de dos capas y de tres capas, la capa superior de GaN se debe

empotrar a un espesor de 1-9 nm en el área de puerta abierta con una rugosidad por debajo de 0,2 nm, y el espesor de la barrera AlGaIn se puede ajustar correctamente.

En todas las estructuras anteriores, el depósito de una capa dieléctrica sobre la parte superior puede ser beneficioso o incluso necesario para obtener un mejor confinamiento (como en el caso de las estructuras de la cara N). Como se muestra en la Fig. 6, para la estructura "C" anterior, puede ser incluso más beneficioso incluir una capa barrera ultrafina (aproximadamente 1 nm) de AlN o AlGaIn con alto contenido de Al sobre la parte superior del canal 2DEG para mejorar el confinamiento.

Las estructuras preferibles de las realizaciones son las estructuras "B" y "C". En la estructura "B", el canal conductor 2DHG se formó en la capa superior de GaN, que tiene una mayor estabilidad química (particularmente hacia la oxidación superficial) que la capa de AlGaIn. En cuanto a la estructura "C", el canal conductor 2DEG podría estar más cerca de la superficie. Por lo tanto, la movilidad de los electrones podría ser menor que en la estructura 2DEG con la polaridad de la cara de Ga. En general, la polaridad de la heteroestructura se puede ajustar mediante la elección del sustrato (p. ej., SiC de la cara C) o por las condiciones de crecimiento.

El canal 2DEG/2DHG (13) formado cerca de la interfase entre la capa de amortiguación (11) y la capa barrera (12) constituye un elemento sensible principal del transistor que reacciona a una carga superficial y potencial. Por lo tanto, el canal 2DEG/2DHG (13) está configurado para interactuar con variaciones muy pequeñas en la carga superficial o proximal o cambios de campo eléctrico en las interfases de capa barrera/líquido o capa barrera/metal/líquido de AlGaIn que interactúan con los estados de trampa de superficie de tipo donador de la capa barrera. Esto se definirá y discutirá a continuación en detalle.

El término "2DEG" mencionado en la descripción y reivindicaciones siguientes no se debe entender ni interpretar como restringido al gas de electrones bidimensional. Como se indicó anteriormente, el gas de huecos bidimensional también puede ser un posible portador de corriente en una estructura de heterounión específica. Por lo tanto, el término "2DEG" se puede reemplazar igualmente por el término "2DHG" sin referencia a ninguna configuración específica de PC-HEMT.

Las características importantes de la presente estructura de PC-HEMT son:

(i) la capa barrera de AlGaIn (12) tiene un espesor de 5-9 nm en el área de puerta abierta (d) entre los contactos óhmicos (15), preferiblemente 6-7 nm, más preferiblemente 6,3 nm, correspondiente al rango de corriente pseudo-conductora entre el modo de funcionamiento normalmente encendido y normalmente apagado del transistor, y

(ii) la superficie de esta capa barrera (12) dentro del área de puerta abierta tiene una rugosidad de 0,2 nm o menos, preferiblemente de 0,1 nm o menos, más preferiblemente de 0,05 nm.

El "área de puerta abierta" del PC-HEMT se define como un área entre los contactos óhmicos de la fuente y el drenaje del transistor que está directamente expuesta a un medio conductor, tal como líquido o gas capaz de conducir corriente. Un ejemplo de líquido conductor es una solución salina electrolítica. En este caso, en lugar de la tensión de puerta fija, que normalmente se aplica a un electrodo de puerta, se aplica un potencial de referencia al sistema electrolito-semiconductor, a través de un electrodo de referencia opcional que se sumerge en el electrolito. Como resultado, en ausencia de la puerta física, el electrolito mismo se convierte en una puerta abierta del transistor. Esto se explicará con más detalle a continuación.

El espesor específico de la capa barrera de AlGaIn (12) en el área de puerta abierta se logra ya sea grabando al ácido en seco el material semiconductor de la capa de AlGaIn (12), es decir, empotrando la capa en el área de puerta abierta con una tasa de grabado al ácido de 1 nm por 1-2 min en un procedimiento controlable, o recubriendo la capa de amortiguación de GaN (11) en el área de puerta abierta con una capa ultrafina del material microcristalino de AlGaIn. Para aumentar la sensibilidad de carga del transistor, la superficie de la capa barrera ultrafina empotrada se trata posteriormente con un procedimiento de epi-grabado al ácido con plasma (cloruro). En consecuencia, la superficie pasivada de forma nativa es activada por el grabado al ácido con plasma para crear enlaces o estados de energía superficial no compensados (ionizados), que se neutralizan después del crecimiento de MOCVD.

En una realización concreta, un sensor comprende el PC-HEMT de la presente invención, o una matriz del mismo, impreso en una placa de circuito impreso flexible (PCB), y cada uno de dichos PC-HEMT está conectado a través de sus contactos óhmicos a su línea eléctrica de contacto específica también impresa en dicha PCB. A continuación, se conecta cualquier fuente de tensión adecuada, tal como una batería de tipo ión Li, a dichas líneas eléctricas de contacto a través del circuito eléctrico para suministrar corriente eléctrica a dichos transistores. Otros elementos del sensor instalado en dicha PCB son un amplificador de corriente de semiconductor de óxido metálico complementario (CMOS) conectado a dicha fuente de tensión para la amplificación de una corriente eléctrica obtenida de dichos transistores, un convertidor analógico a digital (ADC) con tarjeta de entrada/salida digital incorporada conectada a dicho amplificador de corriente para enviar la señal convertida a una interfase de usuario, y un módulo de conexión para la conexión remota del sensor a la interfase de usuario.

Todos los componentes anteriores del sensor pueden ser externos o internos, es decir, integrados en el transistor.

Cada PC-HEMT del sensor prototipo de la presente solicitud se fabrica ahora sobre el sustrato que comprende obleas de silicio de 15,24 cm, la capa de amortiguación de GaN y la capa barrera de AlGaIn de crecimiento ultrafino, como se describió anteriormente. Los parámetros de heterounión de AlGaIn/GaN utilizados en este PC-HEMT en particular se optimizaron para la capa barrera de AlGaIn de la siguiente manera: tapa de 3,5 nm de SiN en la parte superior de la capa de AlGaIn, 6 nm de  $Al_{0,25}Ga_{0,75}N$  y capa de GaN de 2  $\mu m$  depositada sobre el sustrato de la oblea de Si. Todas las mediciones ilustradas adicionalmente con este sensor se llevaron a cabo en las muestras fabricadas sin ningún tratamiento de superficie adicional después de la etapa de modelado de 2DEG/2DHG basado en la implantación de iones.

Dado que los sensores basados en PC-HEMT de la presente solicitud son de tamaño muy pequeño y se deben encapsular dentro de una pequeña cápsula o píldora para su funcionamiento remoto dentro del intestino o el tracto digestivo, deben tener un consumo de energía muy pequeño, lo que ahorra la vida útil de la batería durante un uso prolongado. En este caso, los contactos óhmicos del chip sensor se deben reemplazar por contactos no óhmicos de alta resistencia que conectan capacitivamente el sensor a su circuito eléctrico. Los contactos no óhmicos que reemplazan los contactos óhmicos limitan eficazmente la corriente eléctrica que fluye a través del canal conductor 2DEG/2DHG al tener una resistencia eléctrica 3-4 veces mayor que la resistencia del canal 2DEG/2DHG, lo que reduce el consumo de energía eléctrica sin sacrificar la sensibilidad y funcionalidad del sensor. Por tanto, el uso de contactos no óhmicos en algunas realizaciones del sensor de la presente solicitud es una solución de soporte físico que permite minimizar el consumo de energía de la cápsula o píldora ingerible.

La Fig. 7a muestra una vista en sección transversal de un transistor pseudoconductor de alta movilidad de electrones de puerta abierta (PC-HEMT) de una realización de la presente solicitud que comprende:

- una estructura de heterounión multicapa elaborada a partir de materiales semiconductores monocristalinos o policristalinos III-V, comprendiendo dicha estructura al menos una capa de amortiguación (11) y al menos una capa barrera (12), apilándose dichas capas alternativamente y depositando dicha estructura sobre una capa sustrato (10);
- un canal conductor (13) que comprende un gas de electrones bidimensional (2DEG) o un gas de huecos bidimensional (2DHG) formado en la interfase entre dicha al menos una capa de amortiguación (11) y dicha al menos una capa barrera (12) y proporcionar corriente de electrones o huecos en dicho transistor;
- metalizaciones eléctricas (14) acopladas capacitivamente a dicho canal 2DEG/2DHG (13) para inducir corrientes de desplazamiento (19), creando así contactos no óhmicos de fuente y drenaje que conectan dicho transistor a un circuito eléctrico; y
- un área de puerta abierta (17) entre dichos contactos no óhmicos de fuente y drenaje;

en donde:

- (i) el espesor (d) de dicha capa barrera (12) en dicha área de puerta abierta (17) está en el rango de 5-9 nm, que corresponde al rango de corriente pseudoconductor entre el modo de funcionamiento normalmente encendido y normalmente apagado del transistor, y
- (ii) la superficie de dicha capa barrera (12) tiene una rugosidad de aproximadamente 0,2 nm o menos.

El PC-HEMT, que se muestra en **Fig. 7a**, puede comprender adicionalmente una capa dieléctrica (16) de 1-10 nm de espesor. Esta capa dieléctrica (16) se deposita encima de la capa barrera (12), como se muestra esquemáticamente en **Fig. 7b**, y tiene las mismas características que la capa dieléctrica descrita anteriormente para el PC-HEMT con los contactos óhmicos.

"Acoplamiento capacitivo" se define como una transferencia de energía dentro de un mismo circuito eléctrico o entre diferentes circuitos eléctricos por medio de corrientes de desplazamiento inducidas por campos eléctricos existentes entre los nodos de los circuitos. En general, los contactos óhmicos son los contactos que siguen la ley de Ohm, lo que significa que la corriente que fluye a través de ellos es directamente proporcional a la tensión. Sin embargo, los contactos no óhmicos no siguen la misma relación lineal de la ley de Ohm. En otras palabras, la corriente eléctrica que pasa a través de contactos no óhmicos no es linealmente proporcional a la tensión. En cambio, proporciona una curva pronunciada con un gradiente creciente, ya que la resistencia en ese caso aumenta a medida que aumenta la corriente eléctrica, lo que da como resultado un aumento de la tensión en los contactos no óhmicos. Esto se debe a que los electrones transportan más energía, y cuando chocan con los átomos en el canal conductor, transfieren más energía creando nuevos estados vibratorios de alta energía, aumentando así la resistencia y la temperatura.

Cuando se colocan metalizaciones eléctricas sobre material semiconductor microcristalino, se produce el "contacto Schottky" o el "contacto de barrera Schottky" entre el metal y el semiconductor. La energía de este contacto está cubierta por la regla de Schottky-Mott, que predice que la barrera de energía entre un metal y un semiconductor es proporcional a la diferencia de la función de trabajo metal-vacío y la afinidad semiconductor-electrón de vacío. Sin embargo, este es un comportamiento teórico ideal, mientras que en realidad la mayoría de las interfases entre un metal y un semiconductor siguen esta regla solo hasta cierto punto. El límite de un cristal semiconductor abrupto con

un metal crea nuevos estados de electrones dentro de su banda prohibida. Estos nuevos estados de electrones inducidos por un metal y su ocupación empujan el centro de la banda prohibida al nivel de Fermi. Este fenómeno de desplazamiento del centro de la banda prohibida al nivel de Fermi como resultado de un contacto metal-semiconductor se define como "fijación de nivel de Fermi", que difiere de un semiconductor a otro. Si el nivel de Fermi está energéticamente lejos del borde de la banda, se formaría preferiblemente el contacto Schottky. Sin embargo, si el nivel de Fermi está cerca del borde de la banda, preferiblemente se formaría un contacto óhmico. El contacto de barrera Schottky es un contacto rectificador no óhmico, que en realidad es casi independiente de las funciones de trabajo del semiconductor o el metal.

Por lo tanto, un contacto no óhmico permite que la corriente eléctrica fluya solo en una dirección con una curva de corriente-tensión no lineal que se parece a la de un diodo. Por el contrario, un contacto óhmico permite que la corriente eléctrica fluya en ambas direcciones aproximadamente por igual dentro del rango de funcionamiento normal del dispositivo, con una relación corriente-tensión casi lineal que se acerca a la de una resistencia (por lo tanto, "óhmica").

Las Fig. 7a y 7b ilustran la situación cuando se realiza una conexión eléctrica del transistor al canal 2DEG/2DHG mediante acoplamiento capacitivo a metalizaciones eléctricas a través de un contacto de barrera Schottky. Este acoplamiento sólo es posible si se aplica a las metalizaciones una frecuencia de CA suficientemente alta, superior a 30 kHz. Las metalizaciones eléctricas acopladas capacitivamente al canal 2DEG utilizan el fenómeno conocido de transferencia de energía por corrientes de desplazamiento. Estas corrientes de desplazamiento son inducidas por campos eléctricos existentes entre las metalizaciones eléctricas y el canal conductor operado en el modo de frecuencia de CA a través del contacto Schottky como se explicó anteriormente.

Ahora se hace referencia a la Fig. 7c que muestra esquemáticamente una vista en sección transversal del PC-HEMT de una realización de la presente solicitud con áreas de fuente y drenaje altamente dopadas (18). En este caso, el fuerte dopaje de las áreas de fuente y drenaje puede dar como resultado un desajuste del borde de la banda. Sin embargo, si el semiconductor está lo suficientemente dopado, formará una barrera de potencial lo suficientemente baja como para que los electrones conductores tengan una alta probabilidad de atravesar un túnel, conduciendo así una corriente eléctrica a través del canal conductor 2DEG.

Una conexión eléctrica al canal 2DEG que se muestra en Fig. 7c se realiza con áreas semiconductoras altamente dopadas (18) que se superponen al canal 2DEG y tienen una resistencia eléctrica muy baja. Los iones dopantes tales como boro ( $B^+$ ), fósforo ( $P^+$ ) o arsénico ( $As^+$ ) se crean generalmente a partir de una fuente de gas, por lo que la pureza de la fuente puede ser muy alta. Cuando se implanta en un semiconductor, cada átomo dopante crea un portador de carga en el material semiconductor después del recocido. Se crean huecos para un dopante de tipo p, y se crean electrones para un dopante de tipo n, modificando la conductividad del semiconductor en su vecindad. Se puede utilizar  $As^+$  para el dopaje de tipo n, mientras que se pueden utilizar los iones  $B^+$  y  $P^+$  para el dopaje de tipo p. Por ejemplo, en el caso de la estructura AlGaIn/GaN, las áreas de fuente y drenaje de la estructura de silicio están fuertemente dopadas con  $B^+$  o  $P^+$  para crear una conexión eléctrica al canal 2DEG. Las capas de silicio tienen una resistencia de unión eléctrica muy baja entre sí en ese caso, y para inducir una corriente eléctrica en el canal 2DEG, las metalizaciones se colocan encima de las áreas de fuente y drenaje y se conectan a un circuito.

La tercera opción para minimizar el consumo de energía del sensor sería el uso del fotoefecto que también puede inducir una corriente eléctrica en el canal 2DEG. Para acoplar la excitación de la luz con los efectos electrónicos en el canal 2DEG, se debe crear el fotoefecto en una capa de silicio. Con respecto al fotoefecto directo, es bien sabido que la luz solo puede ser absorbida cuando la energía del fotón absorbido, definida como  $E = h\nu$ , es lo suficientemente grande como para que un electrón se excite en la banda de valencia. En ese caso,  $h$  es la constante de Planck y  $\nu$  es la frecuencia del fotón. La frecuencia se acopla a la longitud de onda  $\lambda$  de la luz mediante la velocidad constante de la luz  $c = \lambda\nu$ . Normalmente, la banda prohibida del silicio a temperatura ambiente es de 1,12 eV, lo que significa que el silicio se vuelve transparente para una longitud de onda superior a 1240 nm, que es el rango del infrarrojo cercano.

Para longitudes de onda más pequeñas (es decir, mayor energía de los fotones), se generan pares de electrones/huecos que conducen a una fotocorriente. En las estructuras de silicio totalmente agotadas e intrínsecamente dopadas, esto da como resultado una mayor densidad de portadores de carga y, en consecuencia, una mayor sensibilidad. Para estas estructuras, la luz se adsorbe en todo el rango visible, lo que hace que estos dispositivos sean fotodetectores ideales. El mecanismo que permite que el semiconductor de silicio se vuelva fotosensible a la irradiación con luz ya ha sido descrito en la bibliografía. En el fotoefecto directo, se puede ajustar por el tamaño, la dirección cristalina y la terminación de la superficie. Estos efectos se originan a partir del confinamiento cuántico bidimensional de electrones en la estructura 2DEG de tamaño nanométrico.

Aunque la irradiación de la estructura de silicio con luz de longitudes de onda más grandes con energías de fotones por debajo de la banda prohibida no tiene suficiente energía para excitar a los portadores de la valencia a la banda de conducción en el silicio a granel, los pares de electrones/huecos también se pueden generar entre la banda de valencia y estados de superficie, y los estados de trampa de superficie de tipo donador todavía se pueden formar (véanse la definición y explicación de los estados de trampa de superficie a continuación). Los electrones en realidad agotan los huecos atrapados en la superficie y, por lo tanto, modulan el campo de la puerta. Los huecos

fotogenerados están confinados en el centro de la estructura de silicio por el campo de la puerta, donde aumentan la conducción del canal 2DEG, debido a la flexión de la banda. Los huecos aumentan la conductividad del canal durante un cierto tiempo de vida hasta que quedan atrapados (recapturados) en la superficie. La ganancia del transistor puede ser extremadamente grande si esta vida útil de re-atrapamiento es mucho más larga que el tiempo de tránsito de los huecos.

Las configuraciones de PC-HEMT descritas anteriormente pueden incluir opcionalmente un material cristalino electroóptico (EO), tal como niobato de litio ( $\text{LiNbO}_3$ ) o tantalita de litio ( $\text{LiTaO}_3$ ). El haz de luz de excitación irradia los cristales de EO con una luz polarizada en un rango de longitud de onda de 400-600 nm, seguido de la irradiación del sensor basado en PC-HEMT. Como se explicó anteriormente, el PC-HEMT también es ultrasensible a la luz de excitación creando los pares p-n en la capa de AlGaIn y afectando fuertemente la conductividad 2DEG. En el estado ultrasensible del PC-HEMT, una cantidad muy pequeña de fotones puede cambiar el canal 2DEG de un modo normalmente apagado a un modo normalmente encendido, lo que da como resultado un fuerte comportamiento pseudoconductor del PC-HEMT, que aumenta la sensibilidad del transistor al menos tres órdenes de magnitud.

Al entrar en contacto con una carga eléctrica del cuerpo, el cristal de OE cambia su absorbancia de luz. Por tanto, el PC-HEMT ultrasensible es capaz de resolver los cambios de intensidad más pequeños de la luz de excitación transferida a través del cristal EO. Debido a que las señales registradas por el PC-HEMT del entorno fluido del intestino y el tracto digestivo son relativamente lentas, este transistor es capaz de controlar y registrar toda la dinámica de estos órganos. Por lo tanto, el uso del PC-HEMT de una realización con el cristal de EO integrado hace posible desacoplar completamente el PC-HEMT de cualquier carga eléctrica parasitaria originada en el cuerpo humano. Dependiendo de la longitud de onda de la luz, se cambia la posición del sensor con respecto al haz de luz incidente. En el caso de la luz IR, que tiene un rango de longitud de onda de aproximadamente 700-1500 nm, el sensor debe instalarse dentro de la cápsula perpendicularmente al haz de luz transmitido desde la fuente de luz instalada en la misma cápsula, para lograr la mayor sensibilidad. La carga parasitaria del cristal de EO debe compensarse mediante electrodos fijados al cristal. Además, el transistor se puede combinar con una variedad de filtros de luz para lograr una longitud de onda de excitación particular.

Dado que los contactos de fuente y drenaje no son óhmicos (acoplados capacitivamente), para poner en contacto eléctricamente el canal 2DEG, que se forma a unos 5-20 nm por debajo de las metalizaciones, se debe utilizar el régimen de frecuencia de CA. Como se mencionó anteriormente, el acoplamiento capacitivo de los contactos metálicos no óhmicos con el canal 2DEG se induce normalmente a una frecuencia superior a 30 kHz. En este caso, no se puede realizar la lectura de CC. En su lugar, se llevan a cabo la lectura de CA o las mediciones de impedancia de la corriente eléctrica que fluye a través del canal conductor 2DEG.

En una realización adicional, el consumo de energía del dispositivo también se puede minimizar usando un algoritmo de soporte lógico que gestiona el tiempo de registro necesario del sensor y un modo de ahorro de batería, que limita los datos de fondo y conmuta la conexión inalámbrica solo cuando es necesario.

Los sensores basados en PC-HEMT de la invención descritos anteriormente son capaces de diagnosticar las condiciones del intestino y el tracto digestivo detectando solo la distribución de carga en el entorno líquido alrededor de la cápsula. Por tanto, estos sensores se pueden definir como "sensores sensibles a la carga". Su mecanismo de control se explica a continuación.

Las Fig. 8a-8b muestran esquemáticamente la interfase de capa barrera de AlGaIn/líquido con la formación de doble capa, circuito de interfase equivalente simplificado y electrodinámica de iones durante la exposición del sensor a una carga positiva (Fig. 8a) y una carga negativa (Fig. 8b). Colocado en un líquido, cualquier potencial de superficie provoca la formación natural de una doble capa electroquímica en la interfase de contacto para mantener el equilibrio de carga entre el estado sólido y el líquido conductor iónico. En las Fig. 8a y 8b, esta doble capa se muestra esquemáticamente junto con el circuito equivalente simplificado en la interfase. La doble capa se crea principalmente con una separación nítida de 1-3 nm de espesor entre las zonas de carga espacial de iones negativos y positivos C2-R2 y C3-R3, que causan una zona de equilibrio de carga espacial secundaria C4-R4 (10 nm a 1  $\mu\text{m}$ ) y la zona de gradiente de carga C5-R5 que desaparece en el líquido a granel. Cuando no hay más cambio de potencial del sólido y del líquido, el equilibrio de carga se mantiene con los elementos C1/R1-C5/R5 que poseen valores casi constantes.

El flujo de iones se muestra esquemáticamente en las Fig. 8a y 8b con flechas vectoriales durante un reordenamiento electrodinámico cuando se introduce una carga externa en un electrolito equilibrado. La Fig. 8a muestra el reordenamiento electrodinámico con una carga positiva externa, y la Fig. 8b ilustra el reordenamiento electrodinámico pero con una carga negativa externa. Cuando los iones reaccionan a un campo eléctrico externo aplicado en el líquido, el circuito equivalente que refleja las cargas espaciales cambia en consecuencia. Dado que el sensor de la invención basado en el PC-HEMT es extremadamente sensible a cualquier cambio de carga superficial (C1/R1), el reordenamiento de iones gradiente en las zonas de carga espacial de C5/R5 a C2/R2 es capaz de modular la conductividad de 2DEG. La dinámica y la magnitud del nuevo equilibrio son directamente proporcionales a la conductividad del electrolito líquido, la movilidad de los iones y el valor de carga externa que define la carga del electrolito resultante. En general, cualquier electrolito mejora fuertemente la respuesta de carga del sensor debido a la excelente transferencia de carga directa hacia la interfase de capa barrera/electrolito. Los iones del líquido del

intestino y del tracto digestivo interactúan directamente con los estados de trampa de superficie altamente sensibles de la capa barrera ultrafina.

Así, cuando una cápsula que contiene los "sensores sensibles a la carga" basados en PC-HEMT se ingiere y entra en un líquido conductor de iones del intestino y del tracto digestivo, los iones líquidos comienzan a reaccionar electrodinámicamente a cualquier carga externa por su movimiento. Al estar en contacto directo con la superficie de la capa barrera de AlGaIn, la sensibilidad de carga se mejora enormemente. Las funciones del líquido del intestino y del tracto digestivo actúan en este caso como una antena líquida virtual que se adapta perfectamente al transductor 2DEG. Estos órganos generan cargas eléctricas y un dipolo en superposición de ellos se proyecta a una antena líquida en la que se sumerge el sensor encapsulado. Dado que la cápsula está en contacto físico con el líquido del intestino y del tracto digestivo, la señal detectada aumenta drásticamente, debido a que el campo eléctrico dentro del intestino y del tracto digestivo se transfiere al líquido con pérdidas mínimas.

Como se comentó anteriormente, en cualquier interfase de estado sólido/electrolito, los elementos capacitivos y resistivos del sensor forman un potencial superficial electroquímico originado a partir de una interacción entre los estados de trampa de superficie y una capacidad de doble capa, mientras que la interacción entre el 2DEG y los estados de trampa de superficie se origina a partir del efecto túnel y fuerzas electrostáticas. Sorprendentemente, se ha descubierto ahora que no se requiere el funcionamiento del sensor PC-HEMT como un transistor de efecto de campo de puerta abierta para modular el potencial electroquímico de la superficie dentro del sistema de capa barrera de AlGaIn/electrolito líquido.

El segundo tipo de sensores basados en PC-HEMT integrados dentro de la cápsula o píldora de una realización son los "sensores sensibles a la presión", que son capaces de medir la presión del tracto digestivo. Estos sensores utilizan las membranas autoportantes para crear un efecto de carga de masa. La **Fig. 9a** muestra una vista en sección transversal de la configuración de PC-HEMT de una realización con membranas autoportantes, que comprende:

- una estructura de heterounión multicapa elaborada a partir de materiales semiconductores monocristalinos o policristalinos III-V, comprendiendo dicha estructura al menos una capa de amortiguación (11) y al menos una capa barrera (12), apilándose dichas capas alternativamente y colocando dicha estructura en membranas autoportantes (23);
- un canal conductor (13) que comprende un gas de electrones bidimensional (2DEG) o un gas de huecos bidimensional (2DHG), formado en la interfase entre dicha capa de amortiguación (11) y dicha capa barrera (12) y que proporciona una corriente de electrones o huecos en dicho transistor entre los contactos de fuente y drenaje;
- metalizaciones eléctricas (14) acopladas capacitivamente a dicho canal conductor 2DEG o 2DHG (13) para inducir corrientes de desplazamiento (19), creando así contactos no óhmicos de fuente y drenaje que conectan dicho transistor a un circuito eléctrico; y
- un área de puerta abierta (17) entre dichos contactos no óhmicos de fuente y drenaje;

en donde:

(i) el espesor (d) de dicha capa barrera (12) entre dichos contactos no óhmicos de fuente y drenaje es de aproximadamente 5-9 nm que corresponde al rango de corriente pseudoconductor entre el modo de funcionamiento normalmente encendido y normalmente apagado del transistor; y

(ii) la superficie de dicha capa barrera (12) tiene una rugosidad de aproximadamente 0,2 nm o menos.

El uso de la configuración anterior con las membranas autoportantes permite aumentar la selectividad del sensor mediante la adición de tensión mecánica (efecto de carga de masa) como un parámetro adicional del sensor basado en PC-HEMT. Las membranas autoportantes (23) son columnas autoportantes muy flexibles de sustrato compuesto de zafiro, silicio, carburo de silicio, nitruro de galio o nitruro de aluminio, preferiblemente nitruro de galio, con un espesor de 0,5-2  $\mu\text{m}$ . Las membranas de sustrato autoportantes son muy sensibles a cualquier cambio de esfuerzo por tracción/compresión/mecánico en la superficie de la estructura de heterounión multicapa. Esto da como resultado un efecto de carga de masa, que se discutirá a continuación.

En general, los sensores mecánicos, al igual que los sensores de presión, se basan en la medición de la deformación inducida externamente en las heteroestructuras. Las propiedades piroeléctricas de los nitruros del grupo III, tales como nitruro de galio, permiten dos mecanismos de transducción de la deformación: piezoeléctrico y piezorresistivo. El efecto piezoeléctrico directo se utiliza para el control de presión dinámica. Para medir la presión estática, estos sensores no son adecuados debido a la fuga de cargas eléctricas en condiciones constantes. Para el funcionamiento estático, es más preferible la transducción piezorresistiva.

Los sensores piezorresistivos que utilizan materiales de banda ancha se han empleado previamente utilizando materiales a granel de carburo de silicio hexagonal para funcionamiento a alta temperatura. La piezorresistividad de

las estructuras de GaN y AlGaIn es comparable a la del carburo de silicio; sin embargo, puede amplificarse aún más mediante una estructura HEMT, como ilustran Eickhoff. *et al* (2001). Para el control de deformación piezorresistiva a presiones relativamente más bajas (o diferencias de presión), se deben utilizar diafragmas o membranas, donde la presión externa se transfiere a una deformación interna modificada causada por flexión, como se muestra en **Fig. 9b**. El cambio de polarización resultante altera la corriente del canal 2DEG que se mide.

Eickhoff *et al* (2001) llevaron a cabo los primeros experimentos en heteroestructuras de AlGaIn/GaN donde el canal 2DEG estaba confinado entre la capa superior de barrera de GaN y AlGaIn y demostraron la dependencia lineal de la resistividad del canal 2DEG de la deformación aplicada. Además, una comparación directa con el SiC cúbico y una sola capa de AlGaIn demostró claramente las propiedades piezorresistivas superiores de esta última. A partir de estos resultados, queda claro que la interacción de las propiedades piezoeléctricas y piezorresistivas mejora la sensibilidad de los sensores de presión mediante el uso de heteroestructuras de GaN/AlGaIn confinadas con el canal 2DEG.

La configuración del sensor que se muestra esquemáticamente en las Fig. 9a y 9b incluye membranas de GaN autoportantes, sensibles a la carga y a la masa, acopladas piezoeléctricamente, que se preparan, por ejemplo, de acuerdo con la Patente de Estados Unidos Núm. 8.313.968 y ofrecen una solución elegante y eficaz para lograr tanto la reducción de escala como una activación de control de baja potencia totalmente eléctrica integrada. Como se mencionó anteriormente, GaN exhibe propiedades piezoeléctricas y piroeléctricas, que se pueden combinar funcionalmente. Mientras que la piezoelectricidad permite la realización de un mecanismo de acoplamiento integrado, el 2DEG ofrece adicionalmente una sensibilidad pronunciada a la tensión mecánica y la carga, lo que permite que el sensor utilice los efectos piroeléctricos. El cambio dinámico en la conductividad 2DEG también es causado por un cambio en la polarización piezoeléctrica.

La Fig. 10a muestra esquemáticamente un diseño de la cápsula o píldora autónoma para control *in vivo* del intestino y el tracto digestivo. Como se detalla anteriormente, existen dos tipos principales de sensores basados en el PC-HEMT de una realización instalada dentro de esta cápsula o píldora: sensor sensible a la carga (21) y sensor sensible a la presión (22). Además, el sensor sensible a la carga-presión combinadas se puede instalar dentro de la cápsula para mejorar el funcionamiento. Como se muestra en la Fig. 10a, estos sensores basados en PC-HEMT están integrados en una matriz junto con fuentes de luz (23, 24), tales como diodos emisores de luz (LED), para la estimulación de la actividad neuronal. Por tanto, en un aspecto particular de la presente solicitud, la cápsula ingerible para diagnóstico del intestino y el tracto digestivo comprende los siguientes componentes:

- un PC-HEMT "sensible a la carga" (21) de una realización (que se muestra en las **Fig. 5a-5c** y **7a-7c**), o una matriz del mismo, instalado en una placa de circuito impreso (PCB) flexible para detectar potenciales de tejido del tracto digestivo creados a partir de señales neuronales o de potenciales de tejido peristáltico muscular, en donde cada uno de dichos PC-HEMT está conectado a un microcontrolador (25) a través de su línea eléctrica de contacto específica impresa sobre dicha PCB;
- al menos un par de fuentes de luz (23, 24) instaladas en dicha PCB para irradiar los tejidos circundantes del intestino y el tracto digestivo con dos longitudes de onda de luz diferentes, estimulando así la actividad neuronal de las células tisulares, que es controlada por dichos " PC-HEMT sensibles a la carga (21);
- un PC-HEMT "sensible a la presión" (22) de una realización (que se muestra en **Fig. 9a**), o una matriz del mismo, instalado en una placa de circuito impreso (PCB) flexible para detectar cambios en la presión del tracto digestivo, en donde cada uno de dichos PC-HEMT está conectado a un microcontrolador (25) a través de su línea eléctrica de contacto específica impresa en dicha PCB;
- el microcontrolador (25) con un convertidor digital a analógico (DAC) y analógico a digital (ADC) para registrar y procesar las señales recibidas de dichos PC-HEMT "sensibles a la carga" y "sensibles a la presión" (21, 22);
- una unidad de batería (26) conectada a dichas líneas eléctricas de contacto mediante un circuito eléctrico para suministrar corriente eléctrica a los componentes de dicha cápsula ingerible; y
- una carcasa de forma cilíndrica y transparente a la luz para envolver dichos componentes de dicha cápsula ingerible, en donde dicha carcasa está elaborada a partir de una membrana biocompatible permeable a los iones (20).

En una realización concreta adicional, la cápsula ingerible para diagnóstico intestinal y del tracto digestivo, como se muestra en Fig. 10b, comprende los siguientes componentes:

- un PC-HEMT "sensible a la carga" (21) de una realización (que se muestra en las **Fig. 5a-5c** y **7a-7c**), o una matriz del mismo, instalado en una placa de circuito impreso (PCB) flexible para detectar potenciales de tejido del tracto digestivo creados a partir de la señalización neuronal o de los potenciales de tejido peristáltico muscular, en donde cada uno de dichos PC-HEMT está conectado a un convertidor digital a analógico (DAC) (25) a través de su línea eléctrica de contacto específica impresa sobre dicha PCB;

- al menos un par de fuentes de luz (23, 24) instaladas en dicha PCB para irradiar los tejidos circundantes del intestino y el tracto digestivo con dos longitudes de onda de luz diferentes, estimulando así la actividad neuronal de las células tisulares, que es controlada por dichos "PC-HEMT sensibles a la carga (21);
- 5     ▪ un PC-HEMT "sensible a la presión" (22) de una realización (que se muestra en Fig. 9a), o una matriz del mismo, instalado en una placa de circuito impreso (PCB) flexible para detectar cambios en la presión del tracto digestivo, en donde cada uno de dichos PC-HEMT está conectado a un convertidor digital a analógico (DAC) (25) a través de su línea eléctrica de contacto específica impresa sobre dicha PCB;
- un convertidor digital a analógico (DAC) (25) para convertir las señales de CA recibidas de dichos PC-HEMT "sensibles a la carga" y "sensibles a la presión" (21, 22) en las señales de CC;
- 10    ▪ un convertidor analógico a digital (ADC) (27) para procesar las señales analógicas recibidas desde el convertidor DAC (25) y convertir dichas señales analógicas en señales digitales para transmitir dichas señales digitales a una unidad receptora;
- al menos un par de antenas (28) para transmitir de forma inalámbrica dichas señales digitales a dicha unidad receptora; y
- 15    ▪ una carcasa de forma cilíndrica y transparente a la luz para envolver dichos componentes de dicha cápsula ingerible, en donde dicha carcasa está elaborada a partir de una membrana biocompatible permeable a los iones (20).

Por lo tanto, el convertidor DAC (25) junto con el convertidor ADC (27) y al menos dos antenas (28) en la configuración anterior constituyen un módulo digital NFC de potencia cero. En otra realización adicional, la cápsula ingerible mostrada en la **Fig. 10c**, para el diagnóstico intestinal y del tracto digestivo, comprende los siguientes componentes:

- 25    ▪ un PC-HEMT "sensible a la carga" (21) de una realización (que se muestra en la **Fig. 5a-5c y 7a-7c**), o una matriz del mismo, instalado en una placa de circuito impreso (PCB) flexible para detectar potenciales de tejido de tracto digestivo creados a partir de señales neuronales o de potenciales de tejido peristáltico muscular, en donde cada uno de dichos PC-HEMT es alimentado por una batería (26) a través de su línea eléctrica de contacto específica impresa sobre dicha PCB;
- al menos un par de fuentes de luz (23, 24) instaladas en dicha PCB para irradiar los tejidos circundantes del intestino y del tracto digestivo con dos longitudes de onda de luz diferentes, estimulando así la actividad neuronal de las células tisulares, que es controlada por dichos " PC-HEMT sensibles a la carga (21);
- 30    ▪ un PC-HEMT "sensible a la presión" (22) de una realización (que se muestra en la Fig. 9a), o una matriz del mismo, instalado en una placa de circuito impreso (PCB) flexible para detectar cambios en la presión del tracto digestivo, en donde cada uno de dichos PC-HEMT es alimentado por una batería (26) a través de su línea eléctrica de contacto específica impresa sobre dicha PCB;
- 35    ▪ una unidad de batería (26) conectada a dichas líneas eléctricas de contacto mediante un circuito eléctrico para suministrar corriente eléctrica a los componentes de dicha cápsula ingerible;
- un convertidor analógico a digital (ADC) (27) para procesar las señales analógicas recibidas por dicha cápsula y convertir dichas señales analógicas en señales digitales para transmitir dichas señales digitales a una unidad receptora;
- 40    ▪ al menos un par de antenas (28) para transmitir de forma inalámbrica dichas señales digitales a dicha unidad receptora; y
- una carcasa de forma cilíndrica y transparente a la luz para envolver dichos componentes de dicha cápsula ingerible, en donde dicha carcasa está elaborada a partir de una membrana biocompatible permeable a los iones (20).

La configuración de la cápsula anterior constituye esencialmente una configuración de la cápsula inalámbrica NFC digital alimentada por batería de una realización. Por tanto, en las tres configuraciones anteriores, la señal digital codificada se utiliza para poner en marcha la cápsula que inicia la transferencia de datos, que se registra internamente y/o como datos en tiempo real. Las modulaciones actuales dentro de los PC-HEMT se transfieren a un código digital por el ADC y adicionalmente se envían a una unidad receptora, tal como un teléfono inteligente, un teléfono con tarjeta, un reloj inteligente o cualquier otro dispositivo compatible con NFC similar. La unidad receptora también puede ser un ordenador de sobremesa, servidor, almacenamiento remoto, almacenamiento en Internet o nube de telemedicina.

En una realización específica, los PC-HEMT sensibles a la carga (21) pueden estar expuestos al entorno líquido (tener un contacto abierto con el líquido intestinal o del tracto digestivo), o se pueden cubrir con la membrana biocompatible permeable a los iones delgada (20).

Los PC-HEMT sensibles a la presión (22) contruidos sobre las membranas autoportantes están protegidos con una tapa de membrana porosa colocada dentro de la cavidad del transistor. Como se muestra esquemáticamente en la Fig. 11, los PC-HEMT sensibles a la presión o sensibles a la carga-presión con membranas autoportantes reaccionan a cualquier movimiento físico del tejido del tracto digestivo provocando pequeñas  $\mu$ - variaciones locales de la presión del líquido (en el rango de sólo unos pocos pascales). Debido a la fenomenal sensibilidad a la presión ultra alta de la membrana autoportante piroeléctrica de estos PC-HEMT, estos pequeños cambios se pueden resolver en el caso del modo de control rápido de aproximadamente 1 fotograma por segundo (fps). En ese caso, se registrará el gradiente de presión, que cambia rápidamente a lo largo del tracto digestivo.

Ahora se hace referencia a Fig. 12 explicando esquemáticamente la acción de los PC-HEMT sensibles a la carga (21). Debido a que son mecánicamente mucho más robustos y completamente biocompatibles, no se necesita protección adicional y pueden estar expuestos al líquido del intestino y del tracto digestivo. Estos PC-HEMT (21) detectan cambios mínimos en los potenciales del tejido del tracto digestivo creados a partir de la señalización neuronal o los movimientos del tejido peristáltico muscular. Como se muestra en la Fig. 12, los tejidos de la pared del tracto digestivo están polarizados a través de la señalización neuronal local o peristáltica muscular. Como resultado, a pesar de su capacidad de control de carga de un solo punto, estos PC-HEMT sensibles a la carga también son capaces de detectar señales diferenciales, siempre que las diferencias de potencial entre cualquiera de estos dos PC-HEMT se midan dentro de la cápsula.

Como se muestra en la Fig. 13, la cápsula se mueve naturalmente a lo largo de todo el intestino y el tracto digestivo con un movimiento de bombeo peristáltico del tracto digestivo. Los diferentes PC-HEMT dentro de la misma cápsula están expuestos de manera diferente a las cargas de tejido de la pared del tracto digestivo y a su señalización neuronal, mapeando así la actividad neuroperistáltica funcional a lo largo de todo el tracto digestivo. Para interactuar con las células de las neuronas del tracto digestivo y activarlas, la cápsula contiene al menos un par de diodos emisores de luz (LED) que irradian el tracto digestivo a diferentes longitudes de onda, por ejemplo, amarillo y azul. Las diferentes longitudes de onda pueden estimular de manera eficaz potenciales neuronales más altos en las paredes del tracto digestivo.

En una realización adicional, la superficie del PC-HEMT se puede funcionalizar con diferentes biomarcadores que hacen posible explorar el tejido del tracto digestivo en función de su actividad optogenética mediante el seguimiento de cambios epigenéticos (nutrigenéticos).

En otra realización adicional más, el método para el diagnóstico del tracto gastrointestinal y el control de la motilidad del tracto digestivo comprende las siguientes etapas:

- 1) Introducir la cápsula ingerible de las realizaciones en un tracto gastrointestinal no modificado de un paciente;
- 2) Registrar las señales eléctricas recibidas desde el tracto gastrointestinal del paciente con los transistores sensibles a la carga y sensibles a la presión en forma de corriente eléctrica de fuente-drenaje de dichos transistores a lo largo del tiempo (definido como dinámica IDS);
- 3) Procesar y convertir dichas señales en señales digitales;
- 4) Transmitir de forma inalámbrica dichas señales digitales a una unidad receptora; y
- 5) Procesar las señales transmitidas en la unidad receptora, correlacionando dicha dinámica  $I_{DS}$  con los ciclos del tejido peristáltico y obteniendo un espectro de actividad neuroperistáltica, proporcionando así información médica sobre la motilidad del tracto digestivo y el estado del tracto GI.

En algunas realizaciones, dicho espectro de actividad neuroperistáltica y la información médica correspondiente se muestran adicionalmente en forma de una representación visual, gráfica o matemática de la dinámica  $I_{DS}$  o cualquier otro formato legible. En una realización particular, la etapa de transmisión de forma inalámbrica de dichas señales digitales a la unidad receptora se realiza mediante un módulo NFC digital de potencia cero o mediante un módulo NFC digital alimentado por batería.

## Ejemplos

### *Diagnóstico de tumores del tracto digestivo en ratones*

Las neoplasias cancerígenas y los tumores malignos en el colon, el intestino delgado y el estómago causan disfunciones de la peristalsis y la señalización neuronal. En consecuencia, se pueden someter a diagnósticos de un solo punto utilizando el sensor PC-HEMT de algunas realizaciones de la presente solicitud. Se realizaron una serie de mediciones en el tracto digestivo de un ratón con el sensor prototipo de la solicitud para demostrar la viabilidad del diagnóstico del tracto digestivo basado en cápsulas. Estos experimentos incluyen mediciones en un tracto digestivo operado quirúrgicamente de un ratón con el control de la entrada de las arterias del tracto digestivo para diferentes fármacos, tales como lidocaína, nifedipina, nicotina y glutamato, que pueden causar proliferación.

Como se muestra en la Fig. 14, el tracto digestivo extraído de un ratón se colocó en una solución nutricional en una placa de Petri con una entrada de medicamento en el interior. El sensor PC-HEMT se colocó en un vaso de precipitados lleno de agua y se conectó al intestino mediante una aguja. La aguja se insertó en la placa de Petri cerca del tracto digestivo, en contacto no invasivo con el tracto digestivo. El electrodo de referencia de Ag/AgCl se colocó en el mismo vaso de precipitados cerca del sensor. La lectura se realizó con un filtro de paso de banda de 1-20 Hz. La Fig. 15 muestra esquemáticamente la configuración de este sensor.

La Fig. 16a muestra los resultados de las mediciones no invasivas de un solo punto del tracto digestivo del ratón sin suministro de medicamento, mientras que la Fig. 16b muestra los resultados de las mismas mediciones, pero con suministro de medicamento. El medicamento causa una disfunción similar a una acción carcinogénica. Las mediciones sin el suministro de medicamento muestran los ciclos de tejido peristáltico saludable que indican la actividad neuroperistáltica saludable. Sin embargo, una vez que el medicamento se suministra en la placa de Petri, las mediciones muestran las fibrilaciones del tracto digestivo locales sin forma que indican disfunciones de la actividad neuroperistáltica similares a las carcinogénicas.

La Fig. 17a muestra dos espectros de Fourier registrados con el sensor PC-HEMT del tracto digestivo de un ratón sin los medicamentos añadidos. La Fig. 17b muestra los mismos espectros de Fourier con la adición de nifedipina y lidocaína para la desactivación de una actividad muscular y neuronal. La diferencia entre los espectros obtenidos con y sin los medicamentos es claramente visible.

Si bien se han ilustrado y descrito en la presente memoria ciertas características de la presente solicitud, muchas modificaciones, sustituciones, cambios y equivalentes resultarán evidentes para los expertos en la técnica.

## Referencias

- S. D. Burnham, K. Boutros, P. Hashimoto, C. Butler, D. W. S. Wong, M. Hu, y M. Micovic, "*Gate-recessed normally-off GaN-on-Si HEMT using a new O<sub>2</sub>-BCl<sub>3</sub> digital etching technique*", *Phys. Status Solidi C*, vol. 7, núm. 7-8, pág. 2010-2012, 2010.
- C. Y. Chang, S. J. Pearton, C. F. Lo, F. Ren, I. I. Kravchenko, A. M. Dabiran, A. M. Wowchak, B. Cui, y P. P. Chow, "*Development of enhancement mode AlN/GaN high electron mobility transistors*", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, núm. 26, pág. 263505, 2009.
- H. Chen, M. Wang, y K. J. Chen, "*Self-aligned enhancement-mode AlGaIn/GaN HEMTs using 25 keV fluorine ion implantation*", in *Device Research Conference (DRC)*, 2010, pág. 137-138.
- M. Eickhoff, O. Ambacher, "*Piezoresistivity of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layers and Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN heterostructures*", *Journal of Applied Physics* 90, 3383 (2001).

**REIVINDICACIONES**

1. Una cápsula ingerible para el diagnóstico intestinal y del tracto digestivo y el seguimiento de la motilidad del tracto digestivo que comprende:

5 1) un transistor sensible a la carga, o una matriz del mismo, para la detección de potenciales del tejido del tracto digestivo creados a partir de la señalización neuronal o a partir de los potenciales del tejido peristáltico muscular,

en donde dicho transistor sensible a la carga es un transistor pseudoconductor de alta movilidad de electrones (PC-HEMT) que comprende:

10 a) una estructura de heterounión multicapa elaborada a partir de materiales semiconductores monocristalinos o policristalinos III-V, comprendiendo dicha estructura al menos una capa de amortiguación y al menos una capa barrera, apilándose dichas capas alternativamente y depositando dicha estructura sobre una capa sustrato;

b) un canal conductor que comprende un gas de electrones bidimensional (2DEG) o un gas de huecos bidimensional (2DHG), formado en la interfase entre dicha capa de amortiguación y dicha capa barrera y que proporciona una corriente de electrones o huecos en dicho transistor entre los contactos de fuente y drenaje;

15 c) los contactos de fuente y drenaje conectados a dicho canal conductor 2DEG o 2DHG y a metalizaciones eléctricas para conectar dicho transistor a un circuito eléctrico; y

d) un área de puerta abierta entre dichos contactos de fuente y drenaje; y

2) un transistor sensible a la presión, o una matriz del mismo, para la detección de cambios en la presión del tracto digestivo,

20 en donde dicho transistor sensible a la presión es un transistor pseudoconductor de alta movilidad de electrones (PC-HEMT) que comprende:

25 a) una estructura de heterounión multicapa elaborada a partir de materiales semiconductores monocristalinos o policristalinos III-V, comprendiendo dicha estructura al menos una capa de amortiguación y al menos una capa barrera, apilándose dichas capas alternativamente y colocándose dicha estructura sobre membranas autoportantes;

30 b) un canal conductor que comprende un gas de electrones bidimensional (2DEG) o un gas de huecos bidimensional (2DHG), formado en la interfase entre dicha capa de amortiguación y dicha capa barrera y que proporciona una corriente de electrones o huecos en dicho transistor entre los contactos de fuente y drenaje;

c) los contactos de fuente y drenaje conectados a dicho canal conductor 2DEG o 2DHG y a metalizaciones eléctricas para conectar dicho transistor a un circuito eléctrico; y

35 d) un área de puerta abierta entre dichos contactos de fuente y drenaje; y

en donde:

40 (i) el espesor de una capa superior (barrera o de amortiguación) de dicha estructura de heterounión multicapa en dicha área de puerta abierta de uno cualquiera de dichos transistores sensibles a la carga o sensibles a la presión es de 5-9 nanómetros (nm) que corresponde al rango de corriente pseudoconductor entre el modo de funcionamiento normalmente encendido y normalmente apagado de los transistores, y

(ii) la superficie de dicha capa superior de la estructura de heterounión multicapa en uno cualquiera de dichos transistores sensibles a la carga o sensibles a la presión tiene una rugosidad de aproximadamente 0,2 nm o menos.

40 2. La cápsula ingerible de la reivindicación 1, en donde dichos transistores sensibles a la carga y sensibles a la presión, o matrices de los mismos, están instalados en una placa de circuito impreso (PCB) flexible, en donde cada uno de dichos transistores sensibles a la carga y sensibles a la presión está conectado a un microcontrolador a través de su línea eléctrica de contacto específica impresa sobre dicha PCB.

3. La cápsula ingerible de la reivindicación 2, que comprende adicionalmente:

45 1) al menos un par de diodos emisores de luz (LED) instalados sobre dicha PCB para irradiar los tejidos circundantes del intestino y el tracto digestivo con dos longitudes de onda de luz diferentes, estimulando así la actividad neuronal de las células tisulares, que es controlada por dichos transistores sensibles a la carga ;

2) el microcontrolador con un convertidor digital a analógico (DAC) y analógico a digital (ADC) para registrar y procesar señales recibidas de dichos transistores sensibles a la carga y sensibles a la presión;

3) una unidad de batería conectada a dichas líneas eléctricas de contacto mediante un circuito eléctrico para

suministrar corriente eléctrica a dicha PCB;

4) un amplificador de corriente integrado o CMOS conectado a dicha unidad de batería para amplificar una corriente eléctrica obtenida a partir de dichos transistores sensibles a la carga y sensibles a la presión;

5) un módulo de conexión para conectar de forma inalámbrica y remota dicha cápsula ingerible a una unidad receptora; y

6) una carcasa de forma cilíndrica y transparente a la luz para envolver los componentes de dicha cápsula ingerible, en donde dicha carcasa está elaborada a partir de una membrana biocompatible permeable a los iones.

4. La cápsula ingerible de la reivindicación 1, en donde dichos transistores sensibles a la carga y sensibles a la presión, o matrices de los mismos, están instalados sobre una PCB flexible, en donde cada uno de dichos transistores sensibles a la carga y sensibles a la presión está conectado a un DAC a través de su línea eléctrica de contacto específica impresa sobre dicha PCB.

5. La cápsula ingerible de la reivindicación 4, que comprende adicionalmente:

1) al menos un par de LED instalados sobre dicha PCB para irradiar los tejidos circundantes del intestino y el tracto digestivo con dos longitudes de onda de luz diferentes, estimulando así la actividad neuronal de las células tisulares, que es controlada por dichos transistores sensibles a la carga;

2) dicho DAC para convertir las señales de CA recibidas desde dichos transistores sensibles a la carga y sensibles a la presión en las señales de CC;

3) un ADC para procesar las señales analógicas recibidas desde dicho DAC y convertir dichas señales analógicas en señales digitales para transmitir dichas señales digitales a una unidad receptora;

4) al menos un par de antenas para transmitir de forma inalámbrica dichas señales digitales a dicha unidad receptora; y

5) una carcasa de forma cilíndrica y transparente a la luz para envolver los componentes de dicha cápsula ingerible, en donde dicha carcasa está elaborada a partir de una membrana biocompatible permeable a los iones;

en donde dicho DAC junto con dicho ADC y dichas antenas constituyen un módulo de comunicación digital de campo cercano (NFC) de potencia cero para la comunicación inalámbrica con dicha unidad receptora.

6. La cápsula ingerible de la reivindicación 1, en donde dichos transistores sensibles a la carga y sensibles a la presión, o matrices de los mismos, están instalados sobre una PCB flexible, en donde cada uno de dichos transistores sensibles a la carga y sensibles a la presión está alimentado por una unidad de batería a través de su línea eléctrica de contacto específica impresa sobre dicha PCB.

7. La cápsula ingerible de la reivindicación 6, que comprende adicionalmente:

1) al menos un par de LED instalados sobre dicha PCB para irradiar los tejidos circundantes del intestino y el tracto digestivo con dos longitudes de onda de luz diferentes, estimulando así la actividad neuronal de las células tisulares, que es controlada por dichos transistores sensibles a la carga;

2) dicha unidad de batería conectada a dichas líneas eléctricas de contacto mediante un circuito eléctrico para suministrar corriente eléctrica a los componentes de dicha cápsula ingerible;

3) un ADC para procesar las señales analógicas recibidas por dicha cápsula ingerible y convertir dichas señales analógicas en señales digitales para transmitir dichas señales digitales a una unidad receptora;

4) al menos un par de antenas para transmitir de forma inalámbrica dichas señales digitales a dicha unidad receptora; y

5) una carcasa de forma cilíndrica y transparente a la luz para envolver los componentes de dicha cápsula ingerible, en donde dicha carcasa está elaborada a partir de una membrana biocompatible permeable a los iones;

en donde dicho ADC junto con dicha unidad de batería y dichas antenas constituyen un módulo NFC digital alimentado por batería para la comunicación inalámbrica con dicha unidad receptora.

8. La cápsula ingerible de una cualquiera de las reivindicaciones 3, 5 o 7, en donde dicha unidad receptora es un teléfono inteligente, teléfono de tarjeta, reloj inteligente o cualquier otro dispositivo móvil similar, un ordenador de sobremesa, servidor, almacenamiento remoto, almacenamiento en Internet o nube de telemedicina.

9. La cápsula ingerible de la reivindicación 1, en donde la estructura de heterounión multicapa de uno cualquiera de dichos transistores sensibles a la carga o sensibles a la presión comprende:

(i) una capa de amortiguación y una capa barrera; o

(ii) una capa de amortiguación superior, una capa barrera y una capa de amortiguación inferior, estando colocada dicha capa barrera entre dichas capas de amortiguación superior e inferior, y el canal conductor del gas de electrones bidimensional (2DEG) se forma en dicha capa de amortiguación superior por encima de la capa barrera, cerca de la interfase entre dicha capa de amortiguación superior y dicha capa barrera, lo que da como resultado la polaridad de la cara N de dicho transistor; o

(iii) una capa de amortiguación superior, una capa barrera y una capa de amortiguación inferior, estando colocada dicha capa barrera entre dichas capas de amortiguación superior e inferior, y el canal conductor de gas de huecos bidimensional (2DHG) se forma en dicha capa de amortiguación superior por encima de la capa barrera, cerca de la interfase entre dicha capa de amortiguación superior y dicha capa barrera, lo que da como resultado la polaridad de la cara de Ga de dicho transistor.

10. La cápsula ingerible de la reivindicación 1, en donde los contactos de fuente y drenaje de dicho transistor son óhmicos o no óhmicos, y cuando dichos contactos de fuente y drenaje son no óhmicos, las metalizaciones eléctricas del transistor están acopladas capacitivamente al canal conductor 2DEG o 2DHG para inducir corrientes de desplazamiento, creando así dichos contactos de fuente y drenaje no óhmicos.

11. La cápsula ingerible de la reivindicación 1, en donde los materiales semiconductores monocristalinos o policristalinos III-V del transistor se seleccionan entre GaN/AlGa<sub>N</sub>, GaN/AlN, GaN/InN, GaN/InAlN, InN/InAlN, GaN/InAlGa<sub>N</sub>, GaAs/AlGaAs y LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub>.

12. La cápsula ingerible de la reivindicación 11, en donde dichos materiales semiconductores monocristalinos o policristalinos III-V son GaN/AlGa<sub>N</sub>.

13. La cápsula ingerible de la reivindicación 1, en donde uno cualquiera de dichos transistores sensibles a la carga o sensibles a la presión comprende adicionalmente una capa dieléctrica depositada sobre la parte superior de la estructura de heterounión multicapa.

14. La cápsula ingerible de la reivindicación 1, en donde la capa sustrato del transistor sensible a la carga comprende zafiro, silicio, SiC, GaN o AlN.

15. La cápsula ingerible de la reivindicación 1, en donde el espesor de la capa superior (barrera o de amortiguación) de uno cualquiera de dichos transistores sensibles a la carga o sensibles a la presión en el área de puerta abierta es de 6 a 7 nm, o de 6,2 nm a 6,4 nm; y la superficie de dicha capa superior tiene una rugosidad de 0,2 nm o menos, o 0,1 nm o menos, o 0,05 nm o menos.

16. La cápsula ingerible de la reivindicación 1, en donde las membranas autoportantes, sobre las cuales se coloca la estructura de heterounión multicapa del transistor sensible a la presión, son columnas autoportantes de sustrato compuesto de zafiro, silicio, carburo de silicio, nitruro de galio o nitruro de aluminio.

17. La cápsula ingerible de la reivindicación 1, en donde uno cualquiera de dichos transistores sensibles a la carga o sensibles a la presión comprende adicionalmente una fuente de luz de excitación para irradiar la estructura de heterounión multicapa, induciendo así una corriente eléctrica en el canal conductor 2DEG o 2DHG.

18. La cápsula ingerible de la reivindicación 17, en donde dicha fuente de luz de excitación es un diodo láser o LED.

19. La cápsula ingerible de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 18, en donde dicha cápsula está adaptada para registrar señales eléctricas recibidas desde el tracto gastrointestinal de un paciente en forma de una corriente eléctrica fuente-drenaje de los transistores sensibles a la carga y sensibles a la presión a lo largo del tiempo (definida como dinámica I<sub>DS</sub>), procesar y convertir dichas señales en señales digitales y transmitir de forma inalámbrica dichas señales digitales a una unidad receptora.

20. La cápsula ingerible de la reivindicación 19, en donde dicha cápsula está adaptada para transmitir de forma inalámbrica dichas señales digitales a dicha unidad receptora mediante un módulo NFC digital de potencia cero o mediante un módulo NFC digital alimentado por batería.

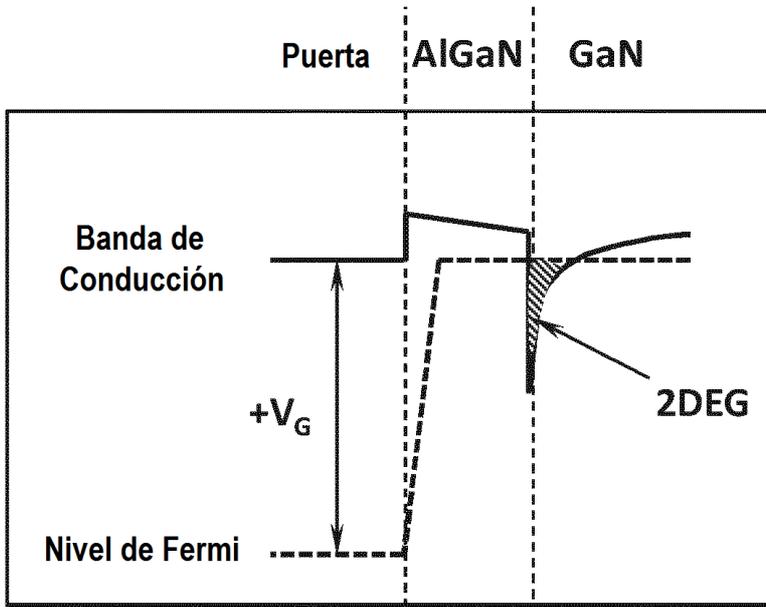


Fig. 1a  
 $V_G \gg V_T$

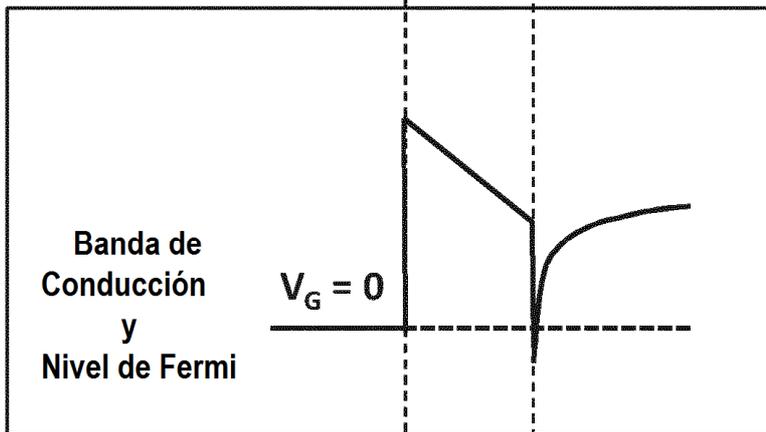


Fig. 1b  
 $V_G = 0$   
 $V_G > V_T$

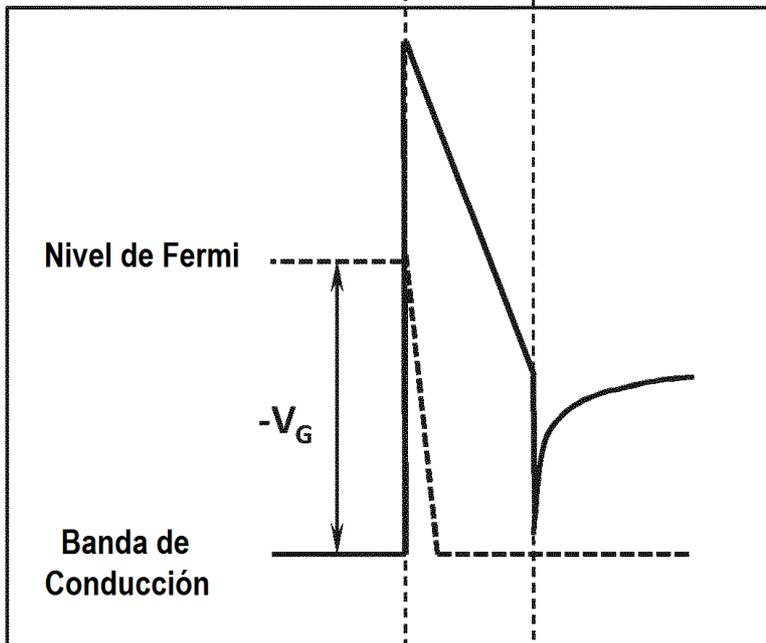


Fig. 1c  
 $V_G \ll V_T$

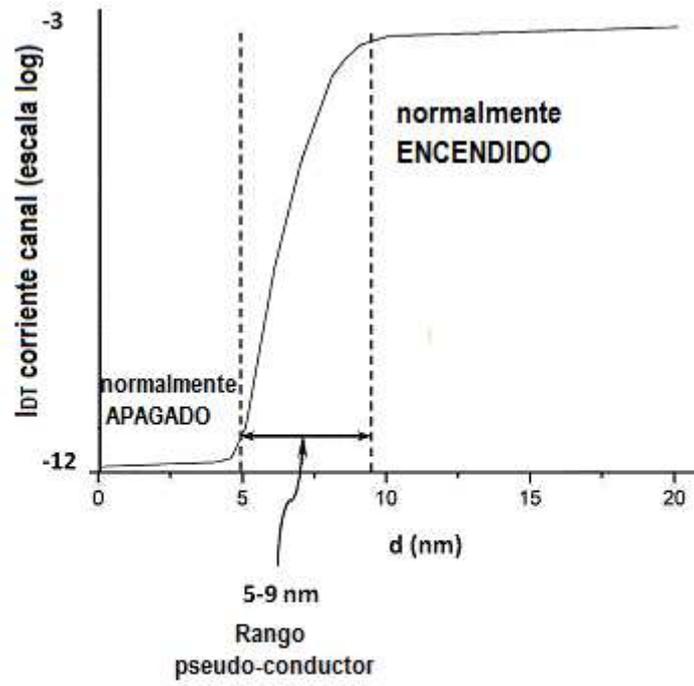


Fig. 2

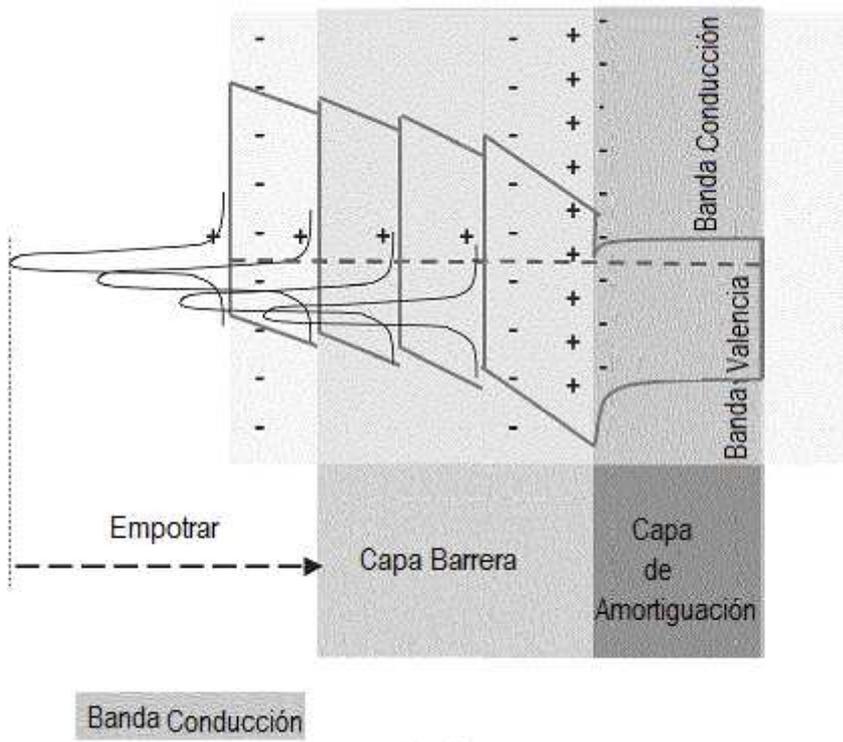


Fig. 3

Fig. 4a

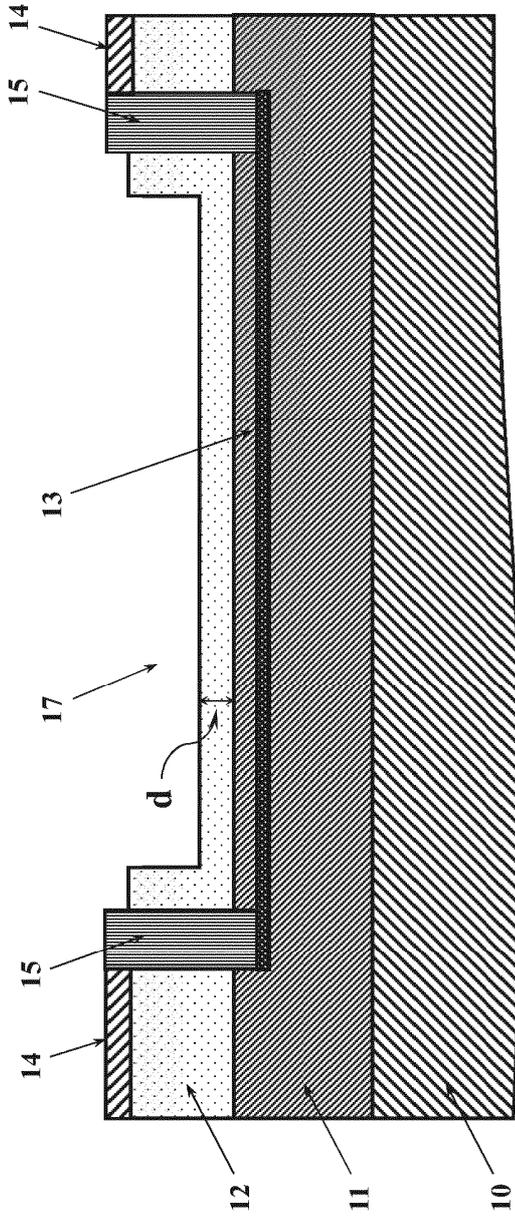


Fig. 4b

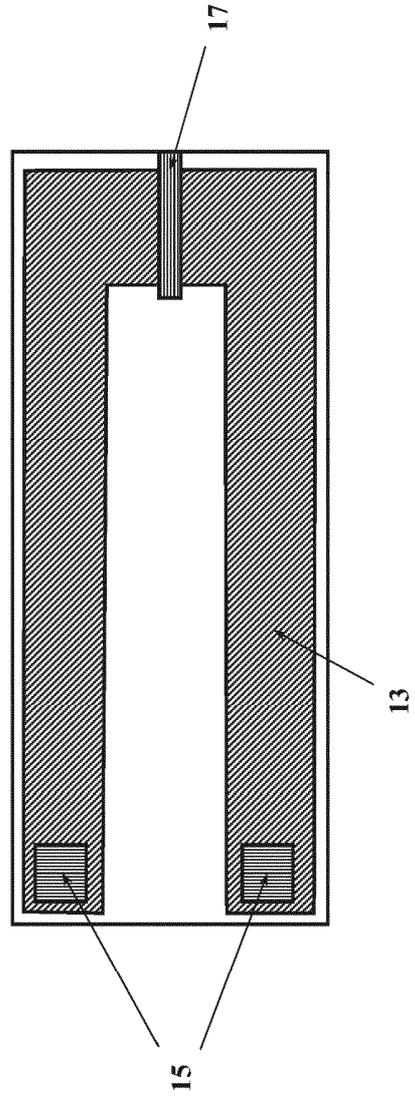
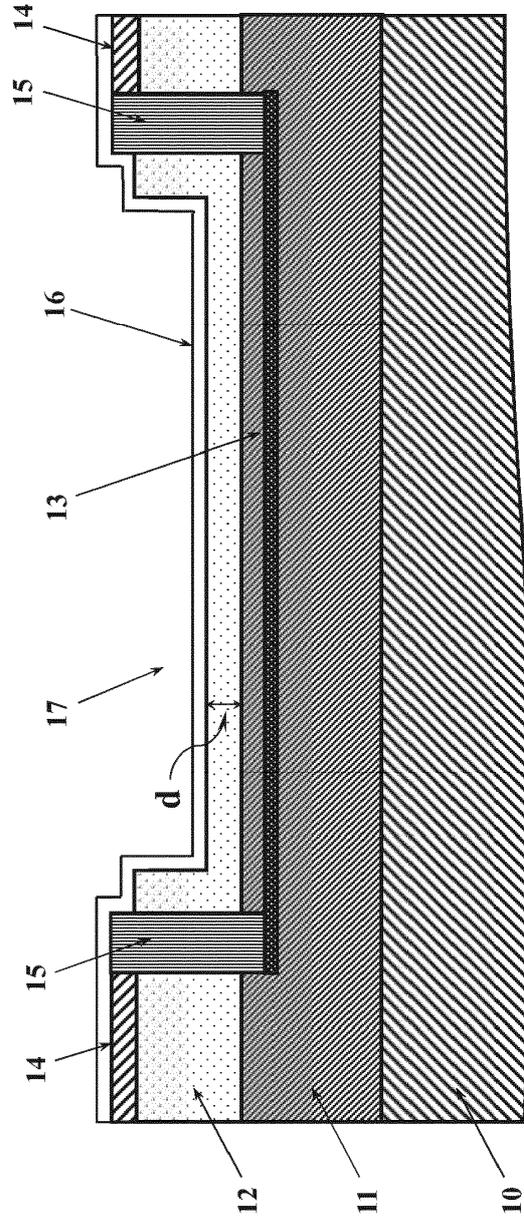
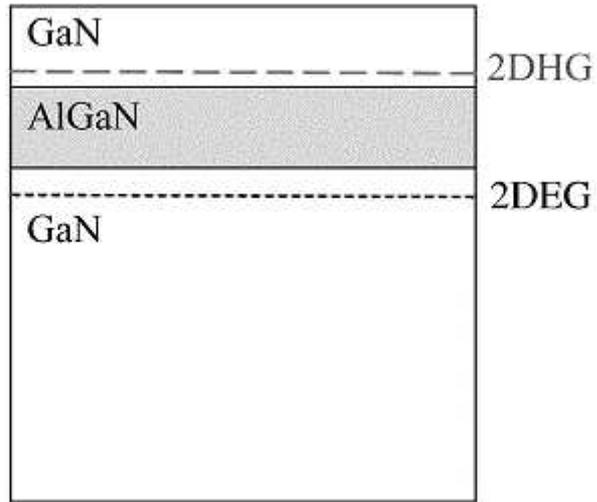


Fig. 4c



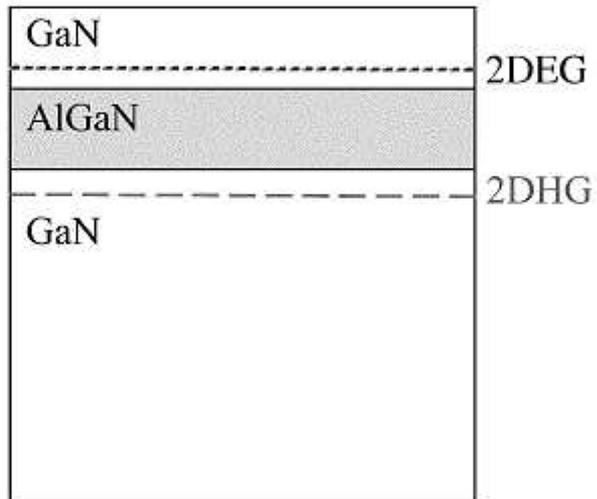
**Fig. 5a**

**Polaridad Cara Ga**



**Fig. 5b**

**Polaridad Cara N**



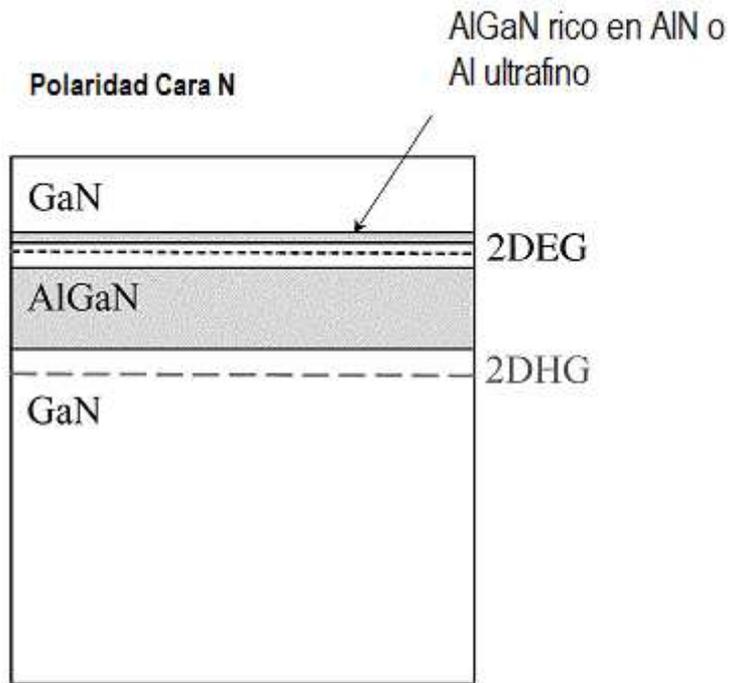


Fig. 6

Fig. 7a

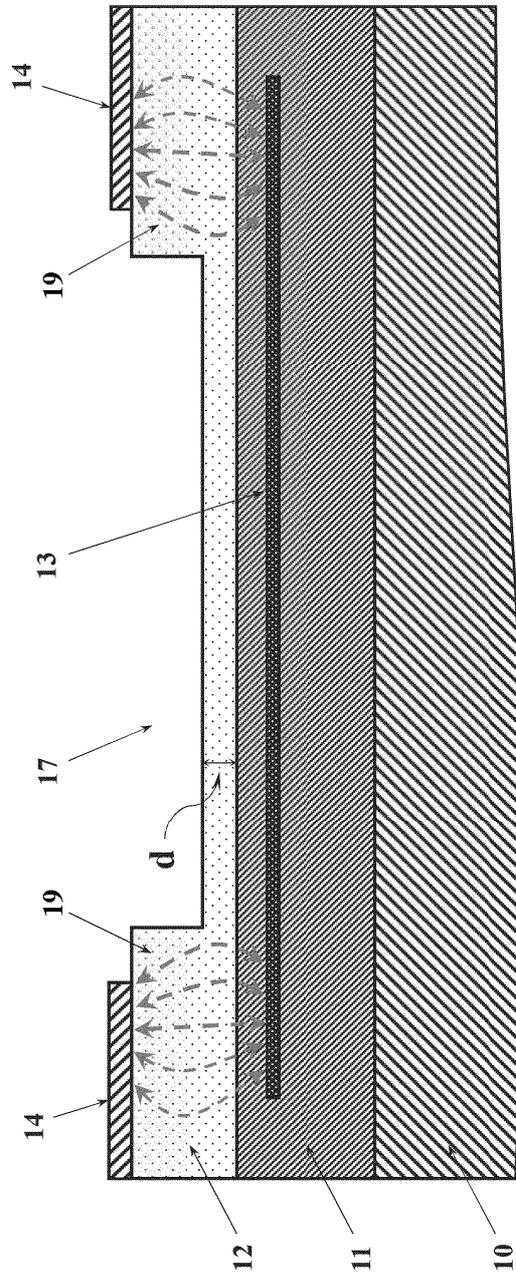


Fig. 7b

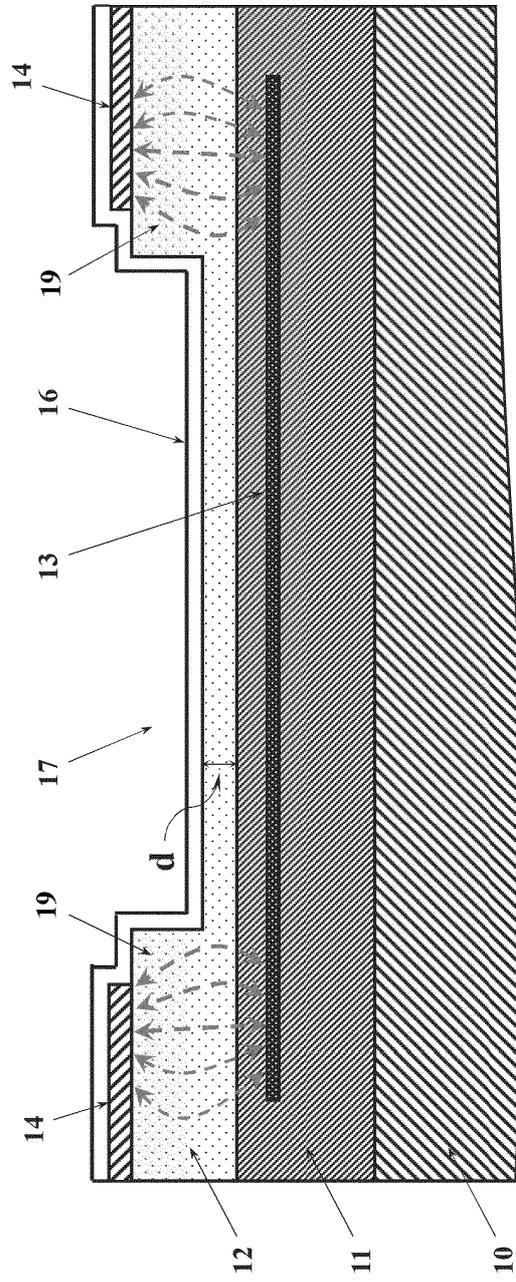


Fig. 7c

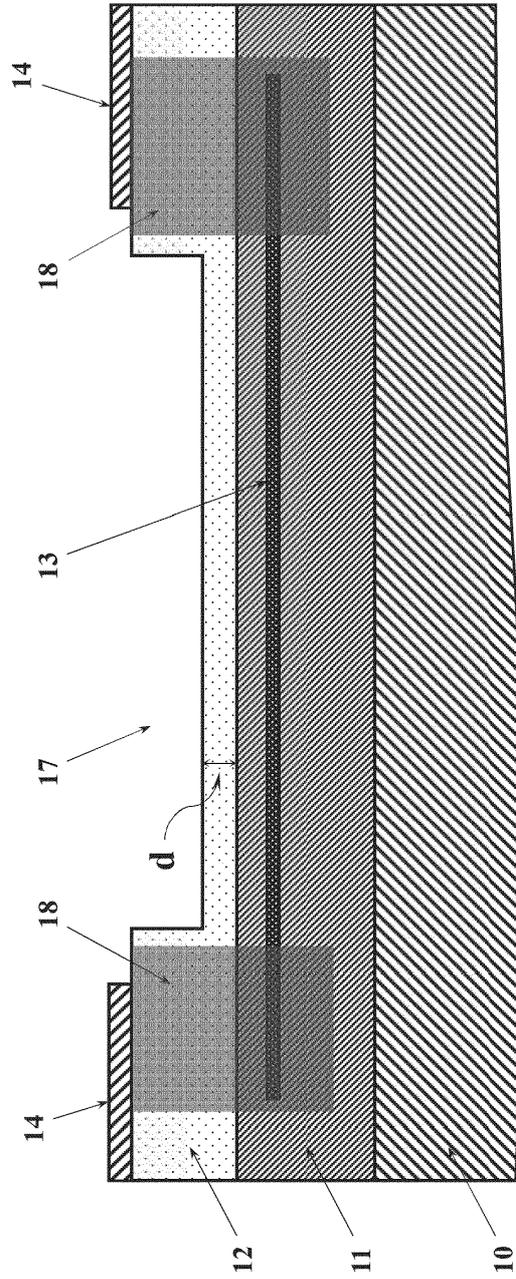


Fig. 8a

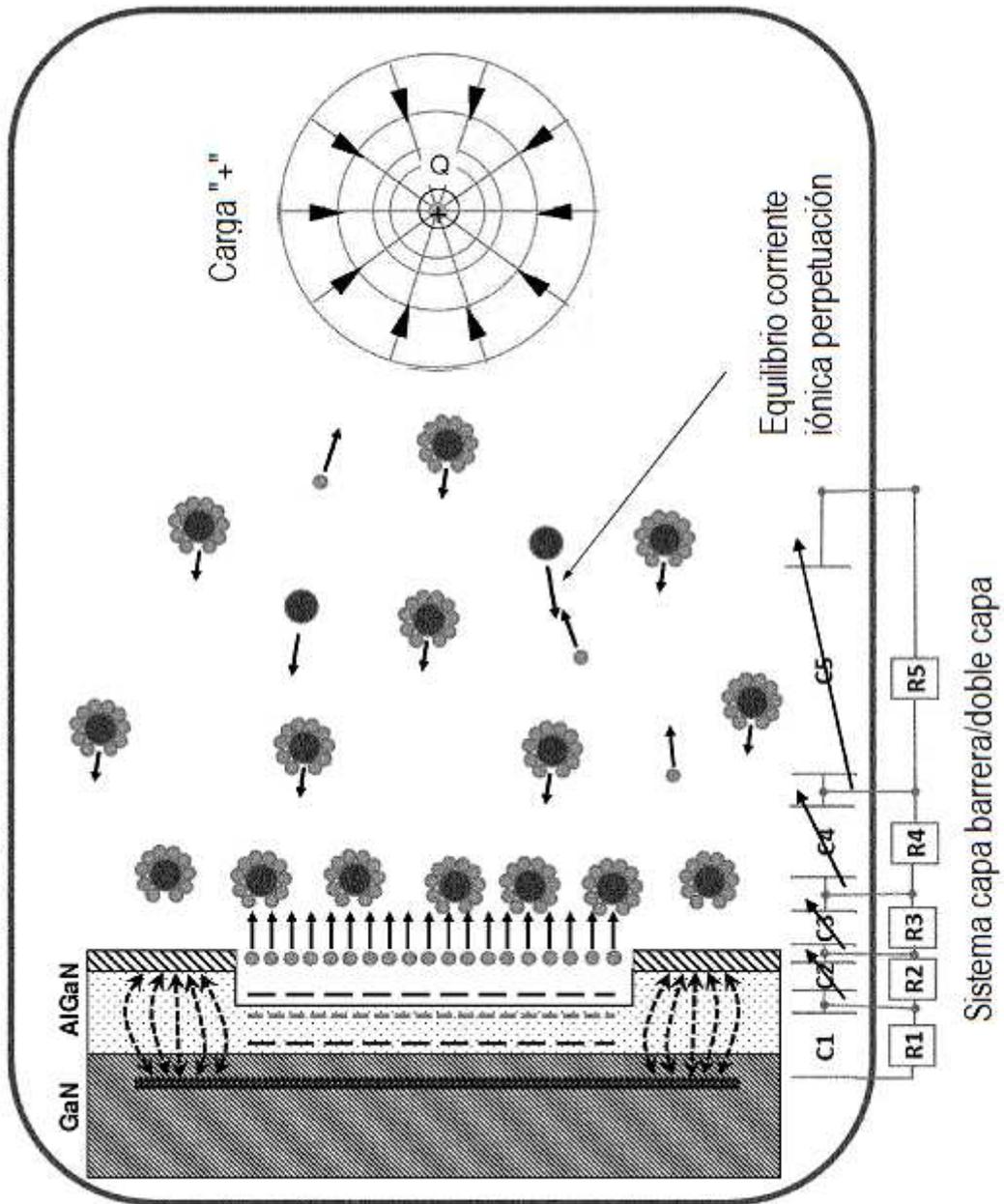
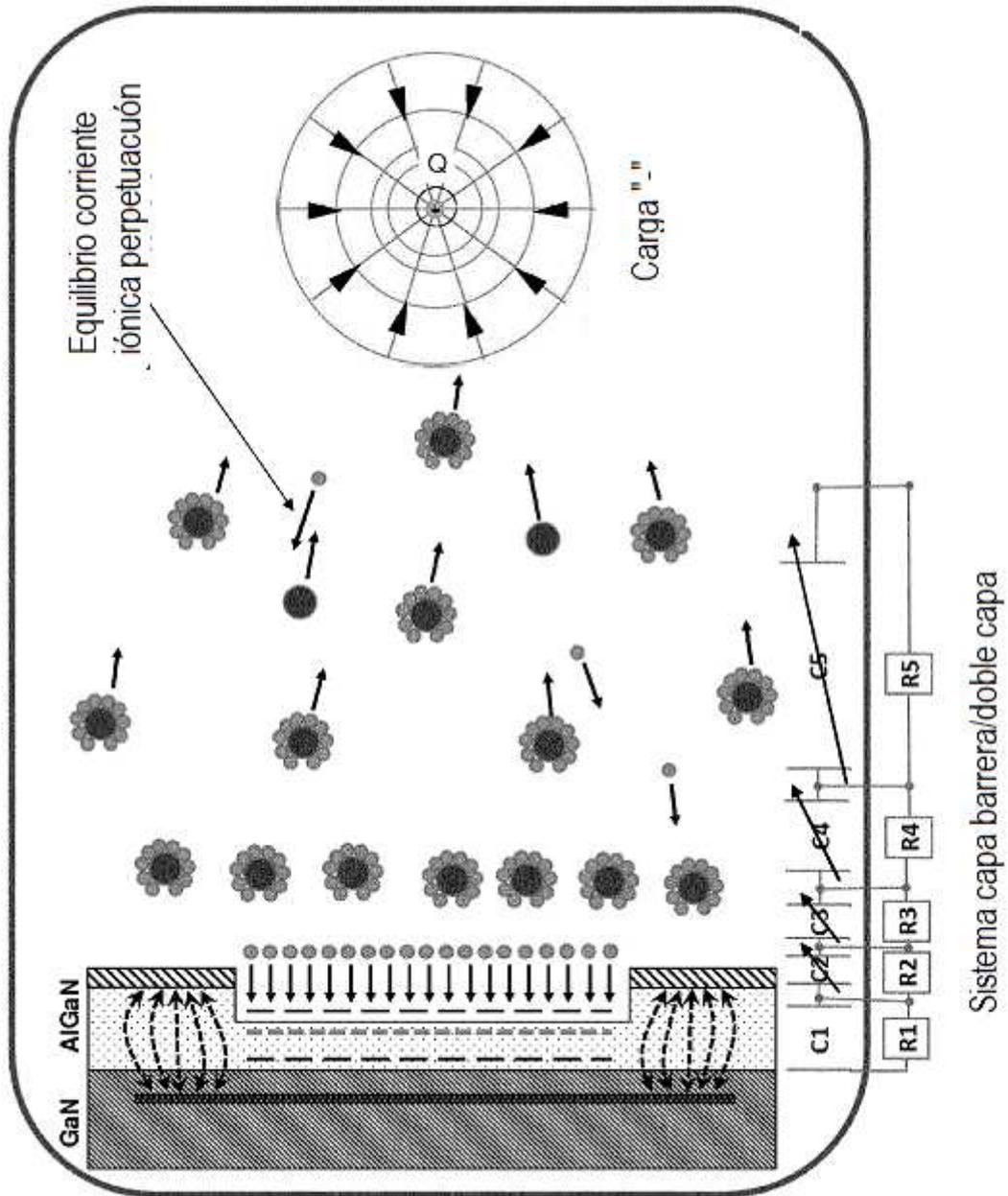


Fig. 8b



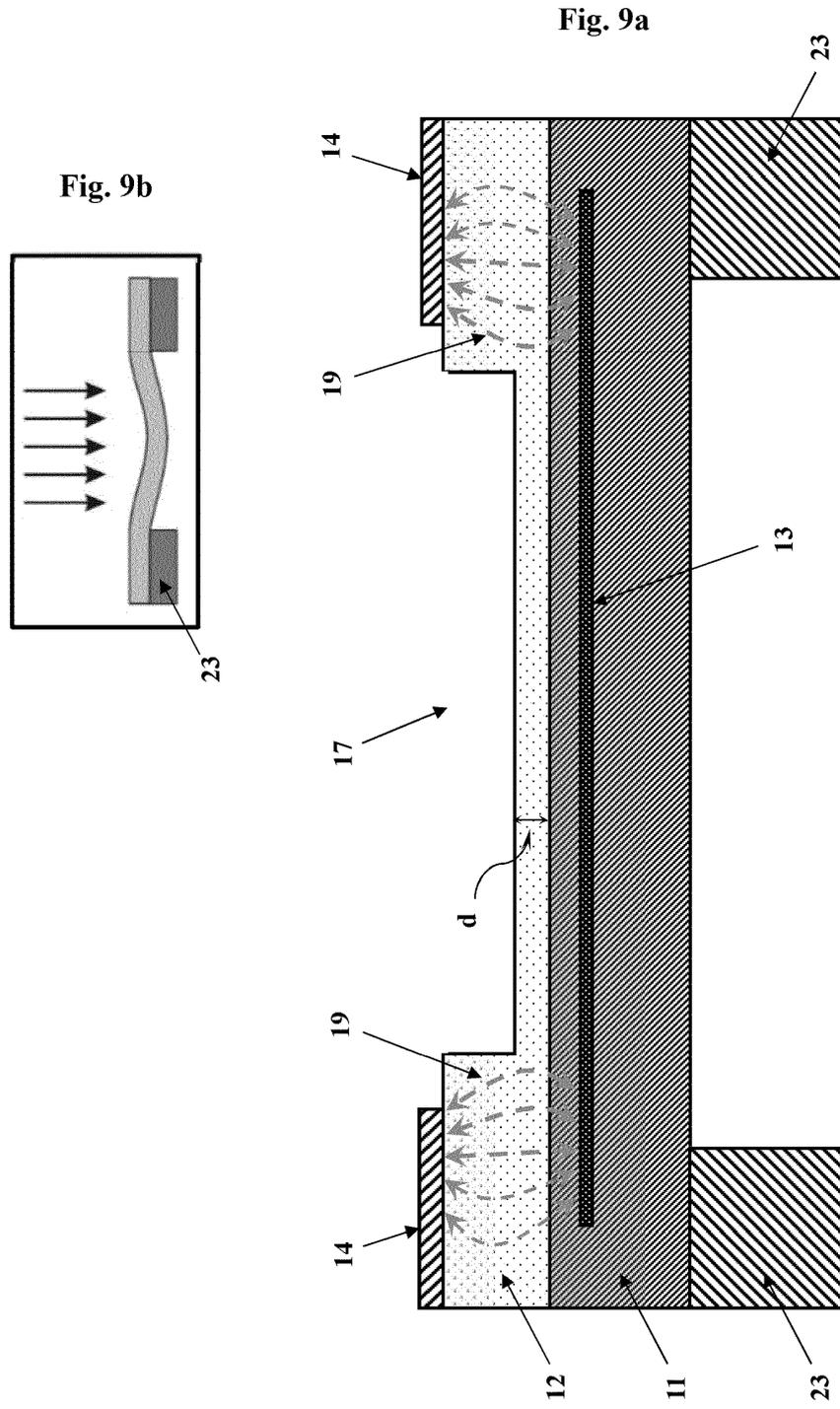


Fig. 10a

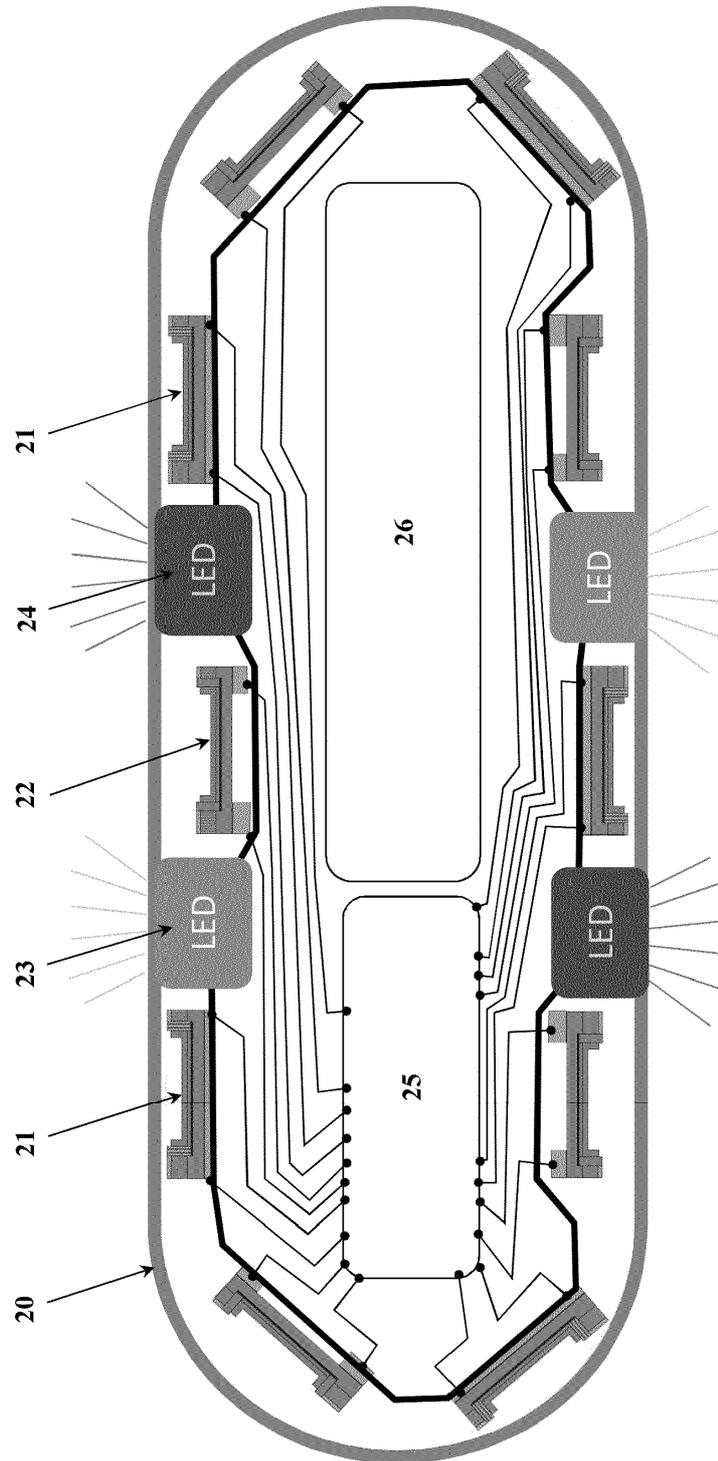


Fig. 10b

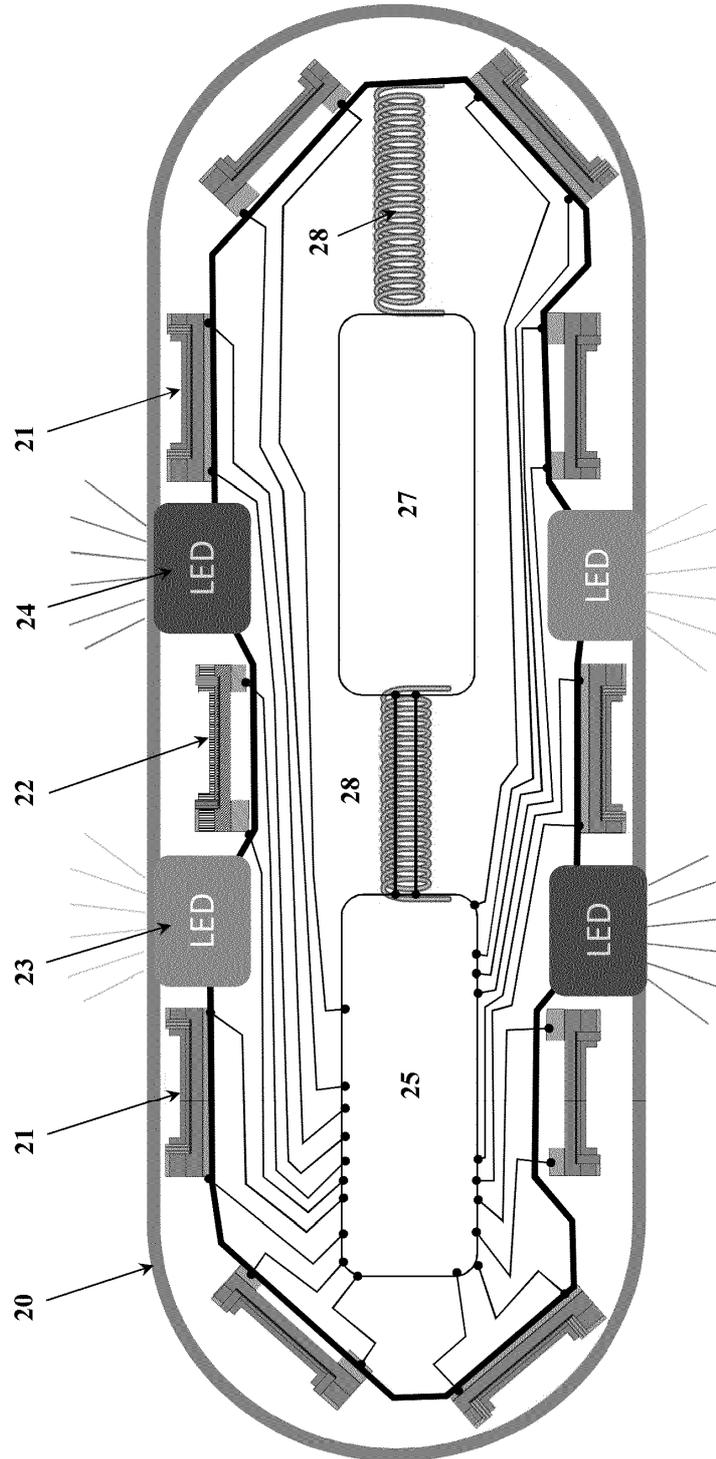


Fig. 10c

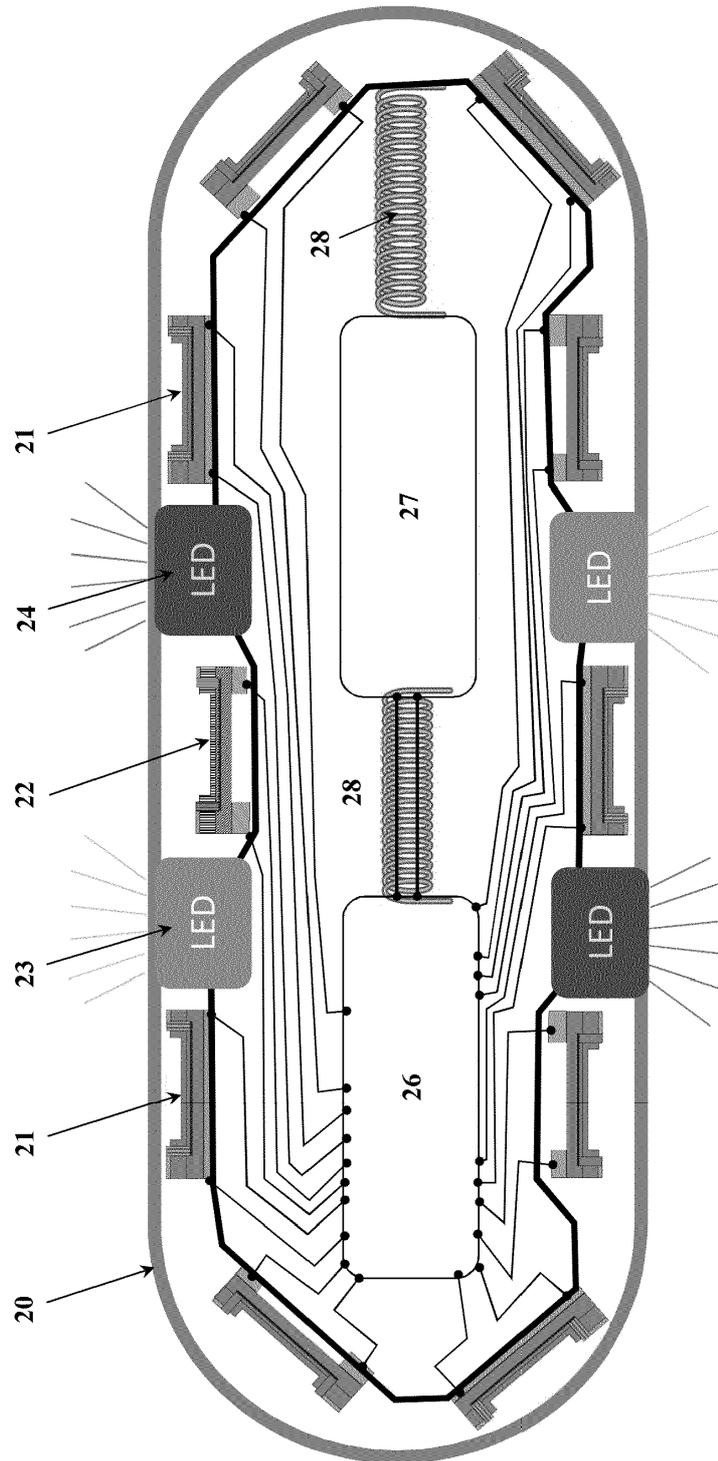


Fig. 11

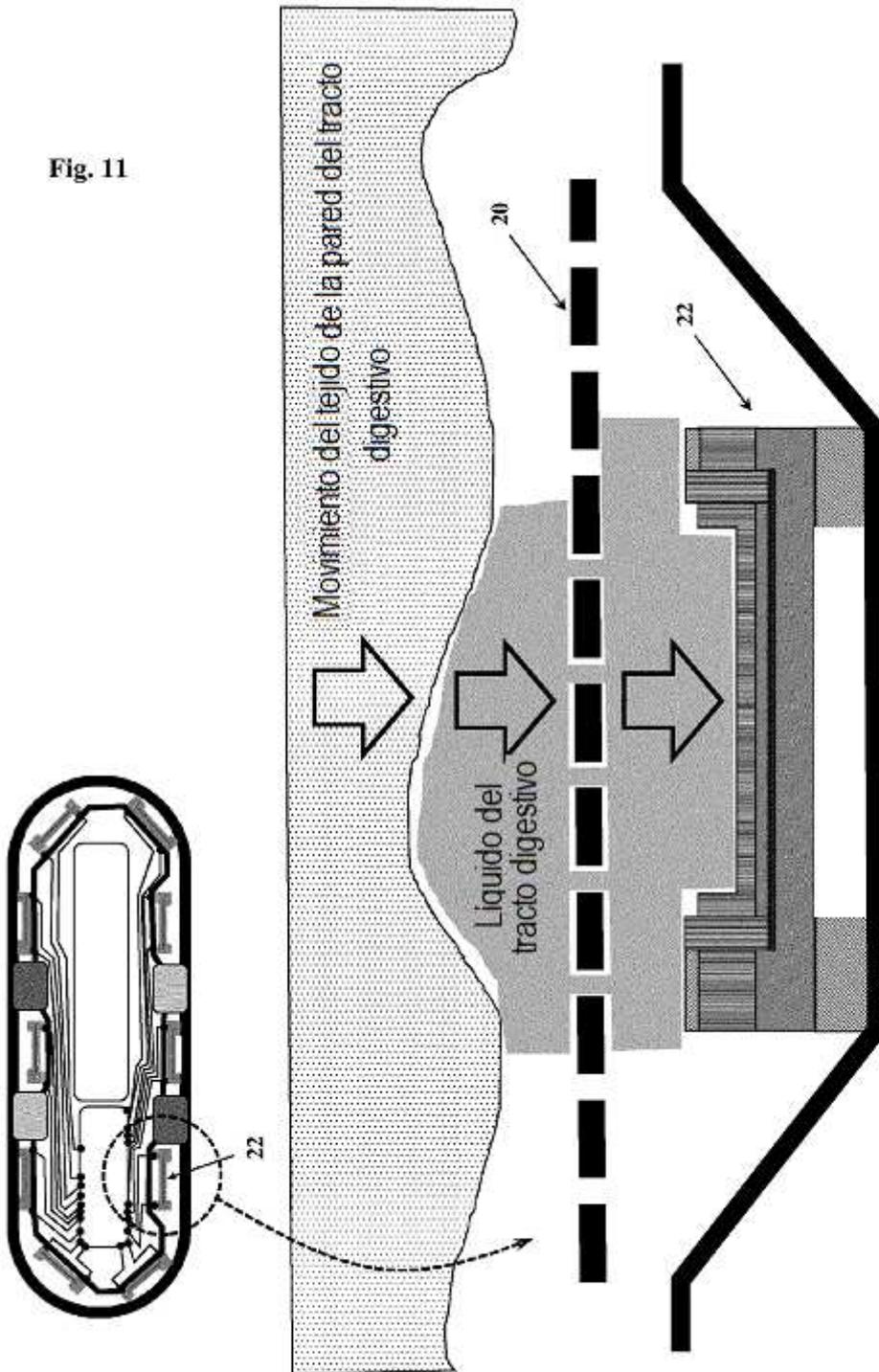


Fig. 12

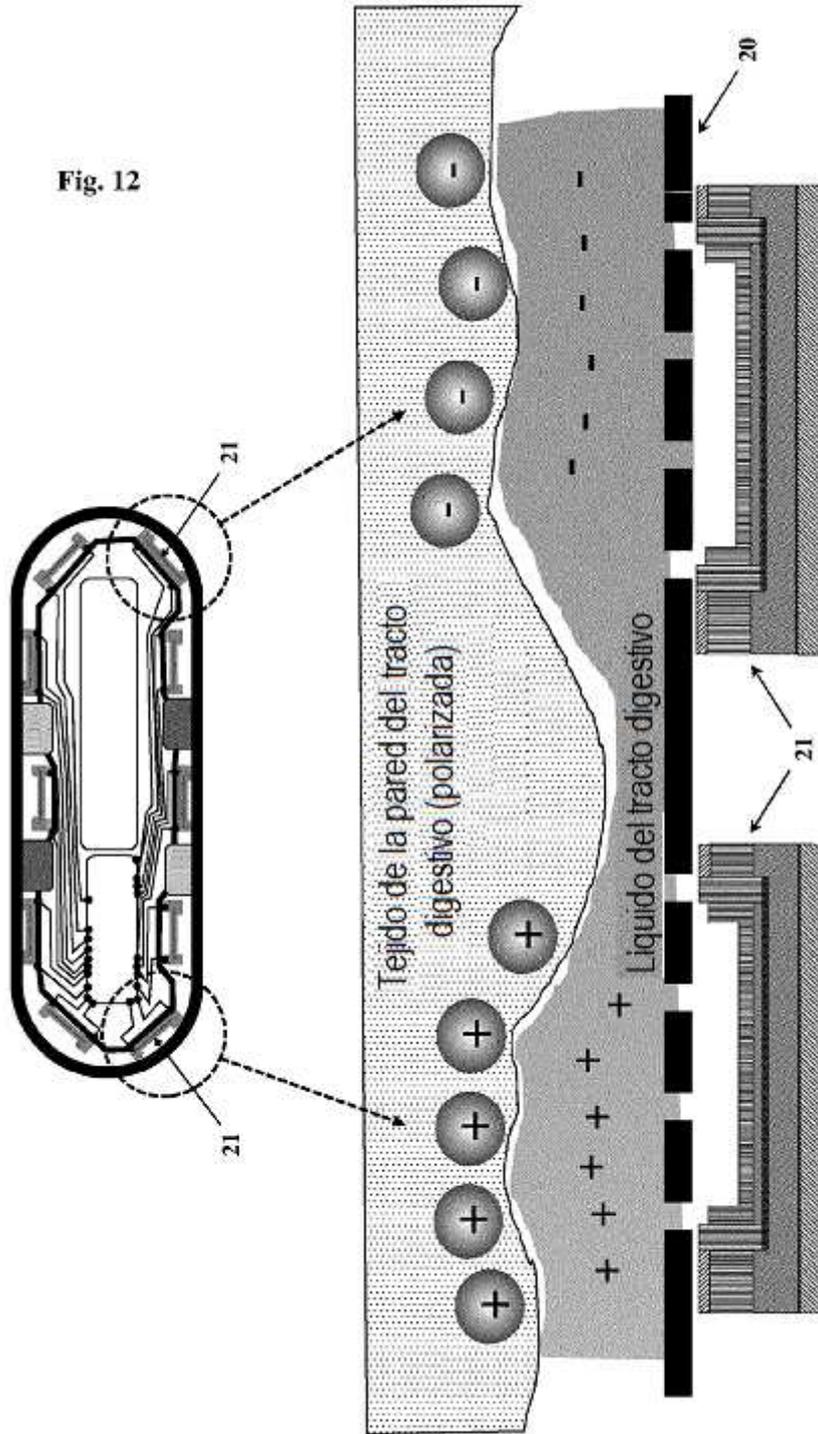


Fig. 13

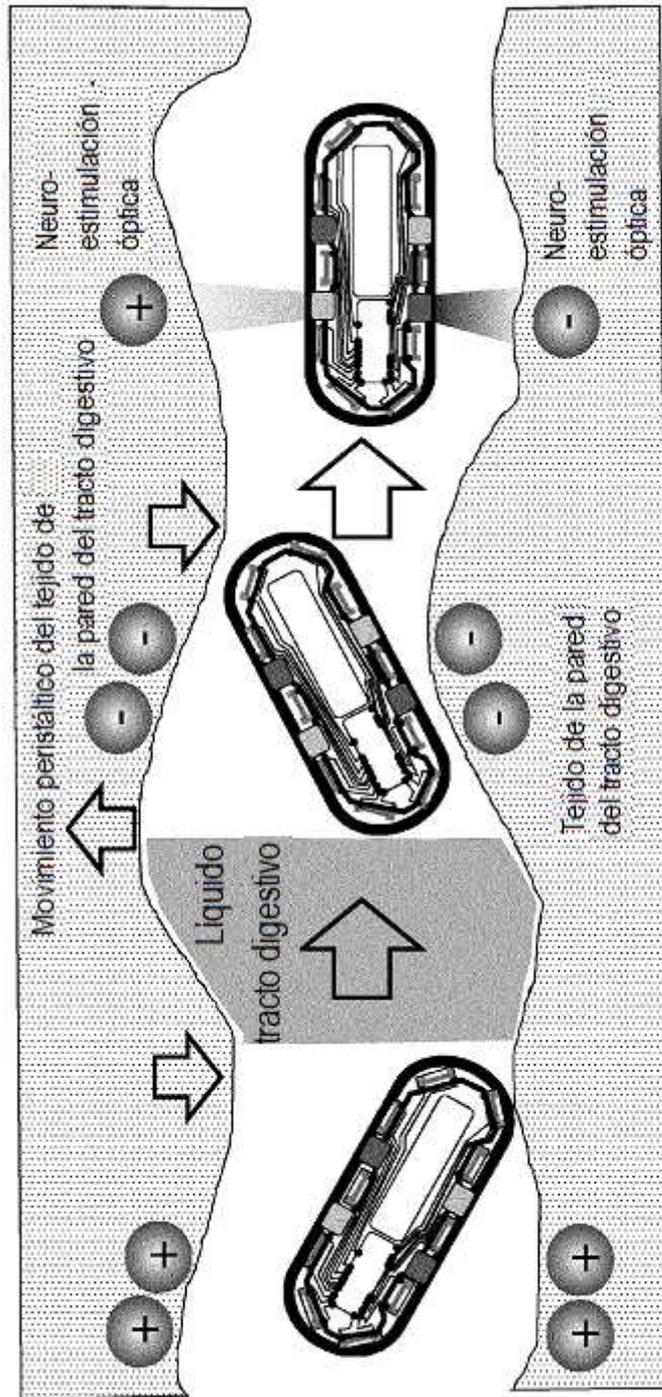


Fig. 14

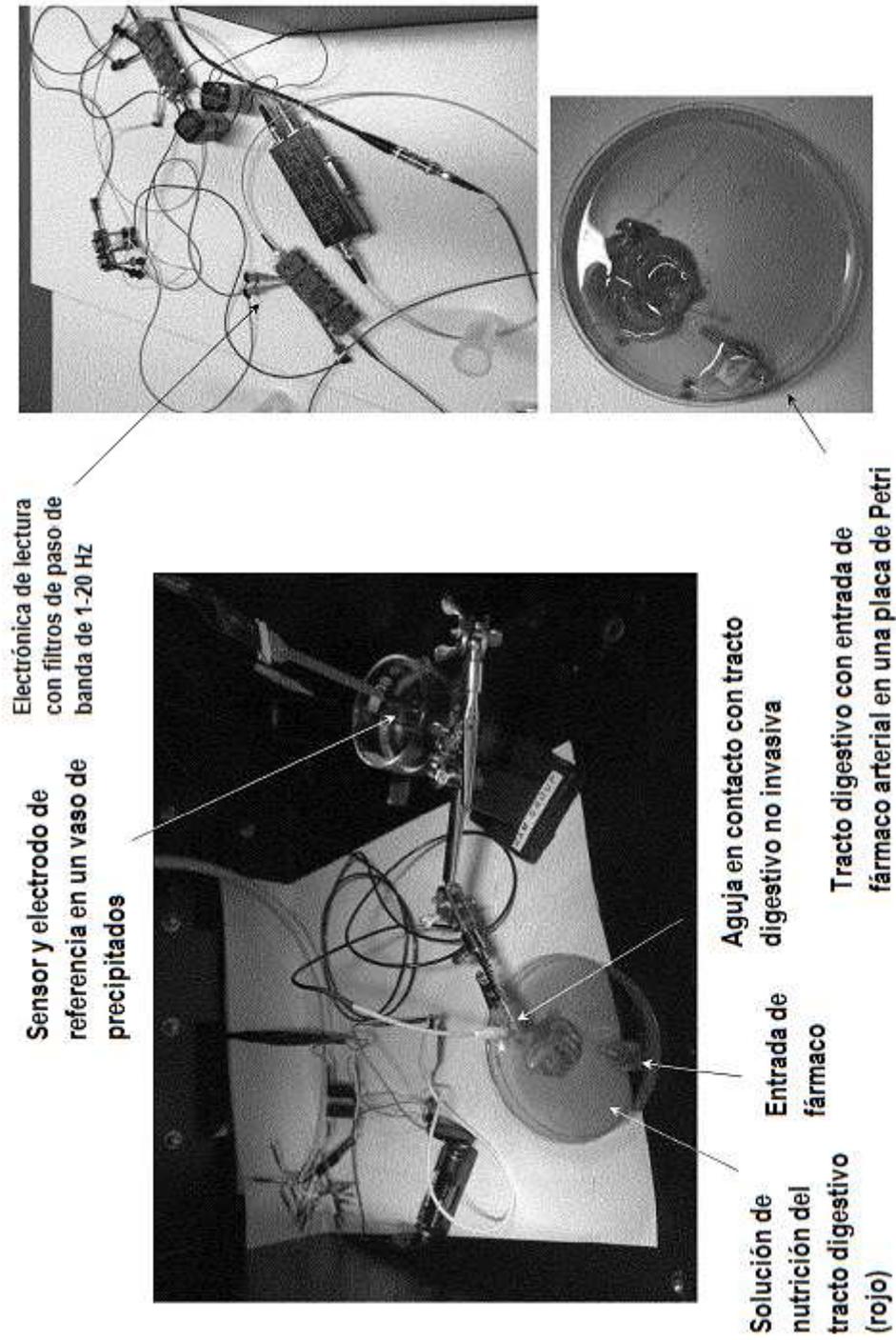
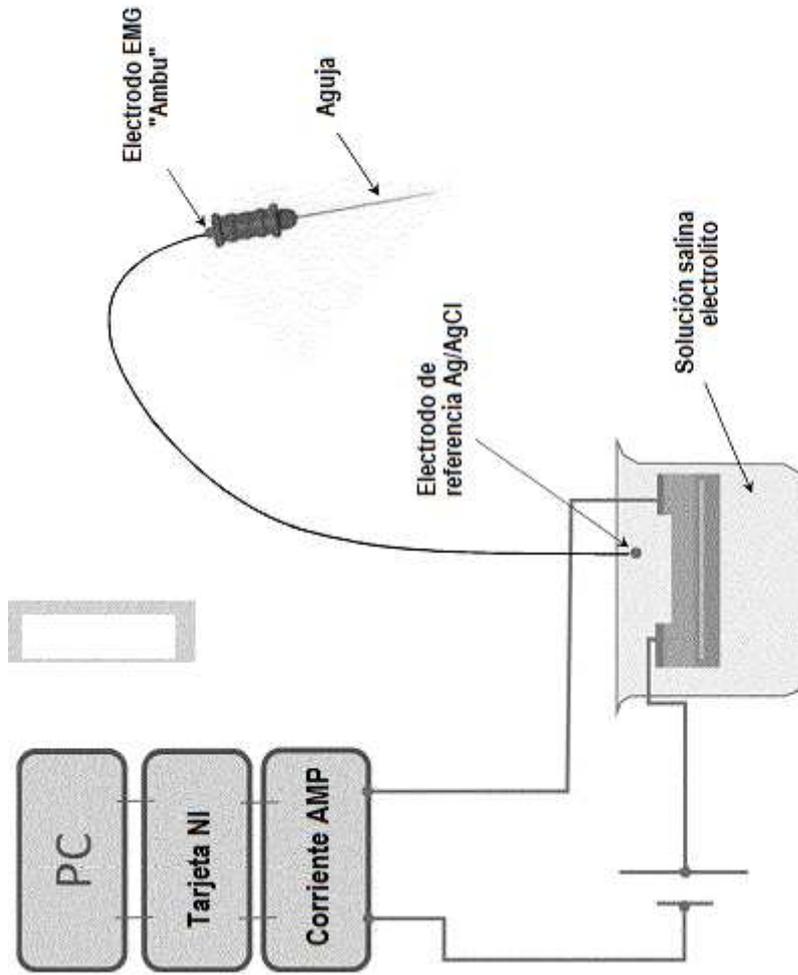


Fig. 15



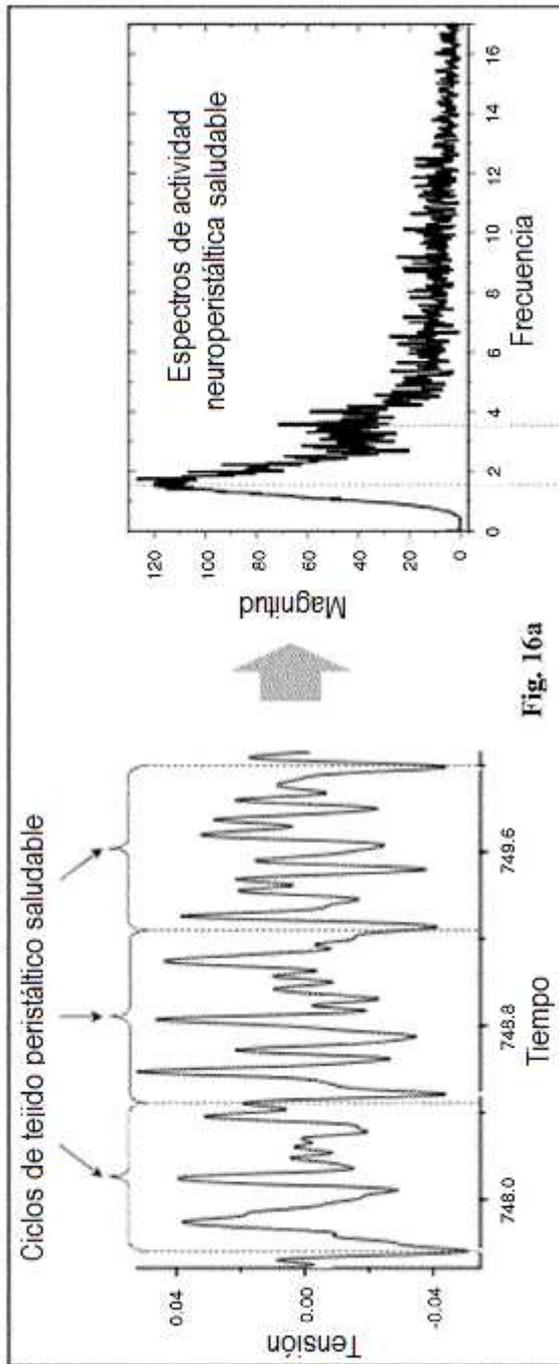


Fig. 16a

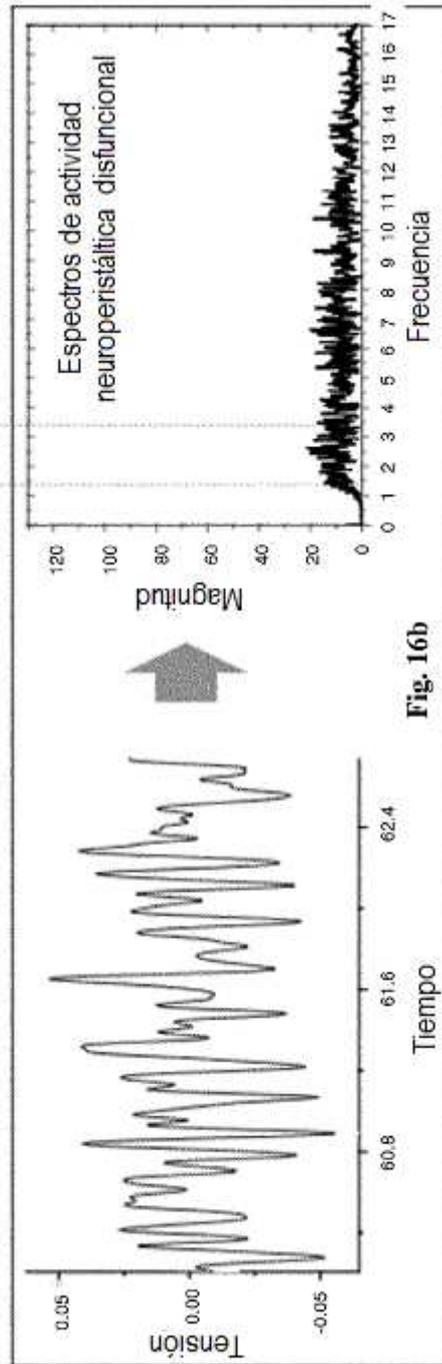


Fig. 16b

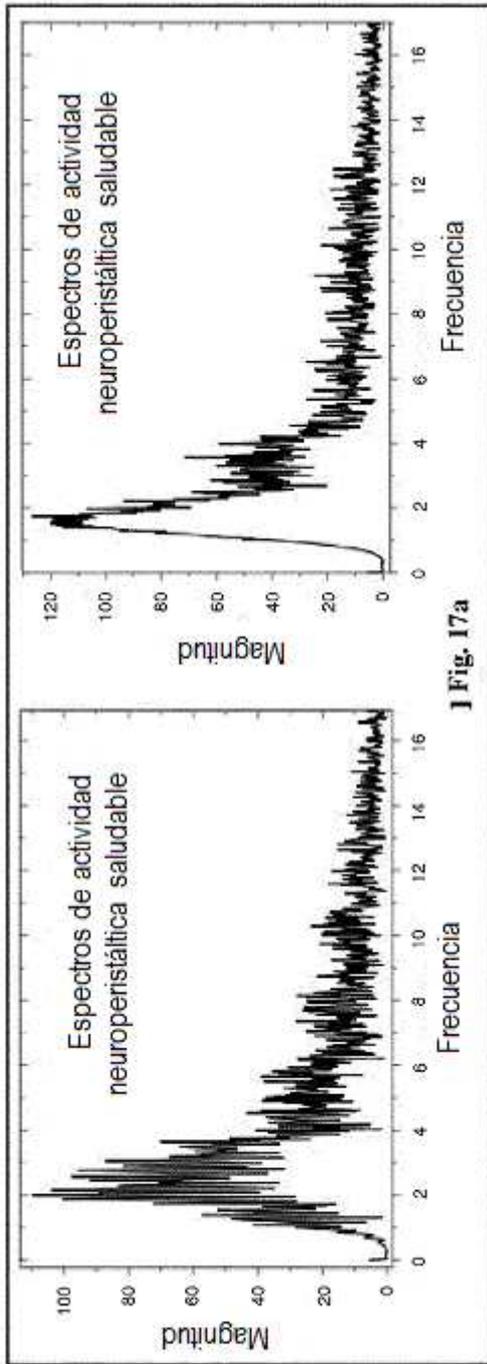


Fig. 17a

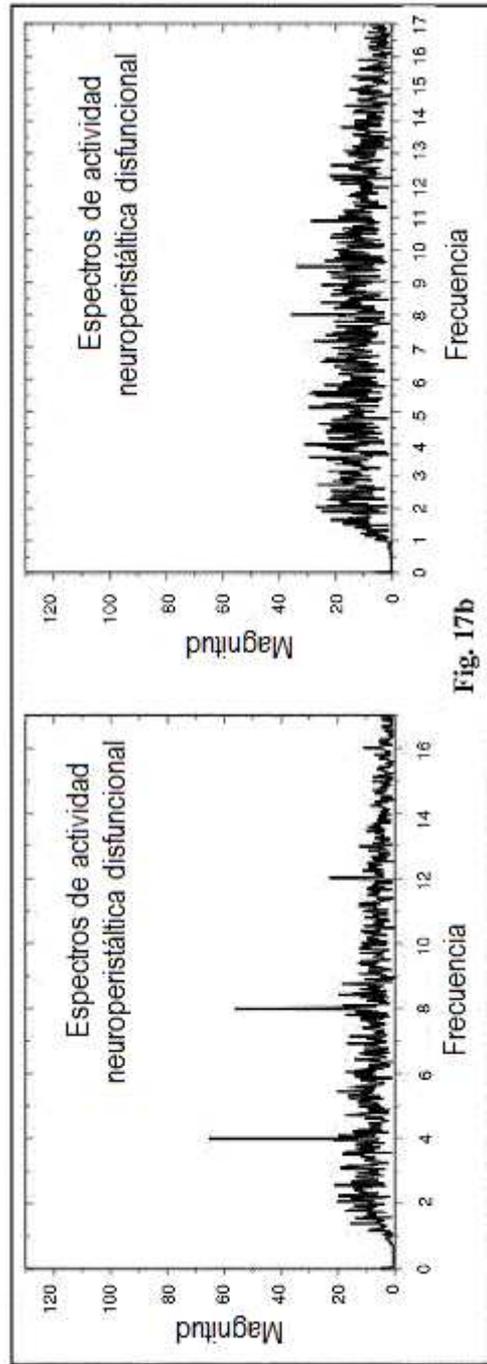


Fig. 17b