

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 806 975**

51 Int. Cl.:

H03H 9/64 (2006.01)

A61B 5/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **10.07.2017 PCT/IB2017/054143**

87 Fecha y número de publicación internacional: **18.01.2018 WO18011697**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.07.2017 E 17745515 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.04.2020 EP 3482495**

54 Título: **Sensor de RFID de onda acústica de superficie para accesorios ponibles hemodinámicos**

30 Prioridad:

11.07.2016 US 201662360754 P

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

19.02.2021

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 2 806 975 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Sensor de RFID de onda acústica de superficie para accesorios ponibles hemodinámicos

Campo técnico

5 En general, la presente solicitud se refiere al campo de los sensores electrónicos basándose en transductores de onda acústica de superficie (SAW) y a su uso en la detección y supervisión continua de campos eléctricos generados por un ser humano. En particular, la presente solicitud se refiere al sensor de RFID de SAW de potencia cero de GaN/AlGaN y a su uso en accesorios ponibles hemodinámicos.

Antecedentes

10 La medicina móvil personalizada ha estado avanzando continuamente durante los últimos pocos años debido al desarrollo de los sensores ponibles, que son capaces de proporcionar de forma inalámbrica información médica esencial mientras se mantienen discretos, cómodos, de bajo coste y fáciles de accionar y de interpretar. Las innovaciones digitales están cambiando la medicina, y la supervisión hemodinámica no es una excepción. En el futuro inmediato, se puede imaginar un mundo en el que los médicos clínicos supervisarán a los pacientes con accesorios ponibles hemodinámicos o sensores implantables capaces de comunicarse con nubes de diagnóstico e integrar la información histórica, clínica, biológica y fisiológica usada en los diagnósticos y en la predicción de eventos adversos, eligiendo la terapia más fundamentada y garantizando que esta se proporcione apropiadamente. La presente solicitud muestra que algunas de estas ideas y productos, incluyendo artilugios personales y accesorios ponibles para la supervisión hemodinámica, se hacen realidad.

20 Frederic Michard ("*Hemodynamic monitoring in the era of digital health*", *Annals of Intensive Care*", 2016, 6:15) revisó las técnicas y dispositivos modernos usados en la supervisión hemodinámica. La mayoría de estas técnicas y dispositivos se basan en algoritmos de contorno de pulso, que permiten, por ejemplo, el cálculo del volumen sistólico y el gasto cardíaco a partir de una curva de presión sanguínea arterial. Su fiabilidad depende principalmente de la relación de señal a ruido (calidad) de la señal de presión y de cambios en un tono vascular. En este contexto, DeBacker *et al* ("*Arterial pressure-based cardiac output monitoring: a multicentre validation of the third-generation software in septic patients*", *Intensive Care Medicine* 2011, 37:233-40) y Slagt *et al* ("*Systematic review of uncalibrated arterial pressure waveform analysis to determine cardiac output and stroke volume variation*", *British Journal of Anaesthesia*, 2014, 112: 626-37) cuestionaron la exactitud y precisión de estas técnicas y dispositivos usando termodilución o ecocardiografía como métodos de referencia, respectivamente.

30 La presión arterial se puede registrar o bien de forma invasiva a partir de una línea arterial o bien de forma no invasiva, a partir de las arterias de los dedos, a partir de la arteria radial y a partir de un manguito para el brazo. La forma de onda de presión arterial también se puede capturar desde cualquier monitor junto al lecho mediante una cámara de teléfono celular, y los parámetros hemodinámicos se pueden calcular mediante una aplicación descargable, tal como Captesia™ de Olivier Desebbe (disponible para Android). Esta aplicación no ha sido aún aprobada para uso clínico, pero ilustra la capacidad de las tecnologías digitales para calcular automáticamente la variación de presión diferencial (PPV) usando una fotografía digital de la forma de onda arterial desde el monitor y seleccionando picos y valles de la curva arterial, ampliando así el marco de las prácticas de supervisión hemodinámica.

40 Los sistemas mecánicos microelectrónicos y nanoelectrónicos (MEMS y NEMS), son sensores de presión miniaturizados basándose en piezoelectricidad y piezorresistividad que están a punto de revolucionar el mundo. Estos son capaces de detectar parámetros hemodinámicos con la precisión alta y una relación de señal a ruido alta. Debido a que son relativamente baratos de fabricar, diminutos, no invasivos e inalámbricos, tales sensores pueden hacer que una supervisión hemodinámica continua sea una realidad más allá de la sala de operaciones y las unidades de cuidados intensivos. Estos sensores pueden ser usados por muchas personas, desde aquellas en riesgo de deterioro hemodinámico hasta pacientes ambulatorios con hipertensión crónica.

45 Además, la posibilidad de detección continua de ECG en la vida diaria es extremadamente importante e inestimable para la atención sanitaria predictiva en la sociedad moderna, en donde las señales de estrés patológico cardíaco se podrían detectar tan pronto como fuera posible. Recientemente se han comercializado relojes de pulsera para medir el pulso, que miden la frecuencia cardíaca desde un punto singular de la muñeca mediante fotopletoxiografía (pulsoxiometría). Los relojes de pulsera Runner Cardio de Tom-Tom® y Alpha de Mio® usan fotopletoxiografía para medir continuamente las ondas hemodinámicas y la frecuencia cardíaca. Su principio de funcionamiento se basa en el método de tiempo de tránsito de pulso con una señal de ECG adicional para el cálculo de la presión sanguínea.

50 En general, un ECG es, por definición, una medición diferencial. Hay una distribución de campo eléctrico de gradiente a lo largo del brazo de acuerdo con una naturaleza corporal de conductor de volumen bioeléctrico y con una fuente de volumen de campo eléctrico dinámico que representa la función de dipolo cardíaco. Este campo eléctrico de dipolo cardíaco crea un mapa de potencial de superficie corporal dinámico sobre la piel, que se mide diferencialmente en al menos dos puntos de piel que representan la señal de ECG. La distribución del campo eléctrico se calcula con métodos numéricos precedentes de fuentes cardíacas. La señal de ECG diferencial se mide usando los electrodos de ECG de gel de Ag/AgCl convencionales cuando el electrodo de referencia se coloca sobre el tórax de un paciente cerca de su corazón y el segundo electrodo se está moviendo gradualmente en la dirección de las puntas de los dedos entre

5 puntos diferentes a lo largo del camino desde el corazón hasta las puntas de los dedos. Normalmente, la señal diferencial alcanza un valor máximo en el codo y permanece constante hasta las puntas de los dedos. Esta observación experimental se origina en la naturaleza de la distribución de campo eléctrico dentro de un cuerpo. Debido a que la amplitud de pico de ECG (pico de Q a R) característica no cambia por debajo del codo y en el área de muñeca, la distribución de señal dificulta notablemente la detección de ECG real con cualquier dispositivo de codo y de muñeca ponible.

10 Por lo tanto, existe una demanda de un nuevo tipo de sensores ponibles, que se basaría en un principio de detección diferente. Solo hay dos técnicas de detección no diferencial existentes que se han desarrollado recientemente para la supervisión cardiovascular en el tórax o incluso en las extremidades inferiores. Nakayama *et al* (2011) y An *et al* (2012) describieron sensores de campo magnético basados en CMOS microelectrónicos basándose en el efecto de magnetoimpedancia gigante. Estos tipos de dispositivos microelectrónicos eran capaces de detectar las señales de punto singular de magnetocardiografía (MCG) desde el tórax, pero no pudieron detectar la señal de MCG desde la muñeca.

15 Kado *et al* (2010) describieron detectores optoelectrónicos que cambian sus propiedades ópticas, tales como reflectancia, como una función de la magnitud de campo eléctrico. Tales transductores ya han hallado su aplicación en sistemas de RFID personales, por ejemplo NTT de RedTacton®. Sin embargo, la detección de las señales de ECG de extremidad inferior basándose en un potencial de piel no diferencial o la supervisión cardiovascular remota sigue sin comprobar y aún supone un desafío.

20 Pearton *et al* (2004) revisaron transistores y diodos basados en GaN para la detección de productos químicos, de gas, de productos biológicos y de presión, y mostraron que los transistores de movilidad de electrones alta de AlGaIn/GaN (HEMT) exhiben una dependencia muy fuerte de la corriente de fuente/drenador en los canales de gas de electrones bidimensional (2DEG) piezoelectrónicos e inducidos por polarización con las variaciones en las condiciones de frontera electrostática de la superficie libre por encima del 2DEG (líquidos polares, descomposición del hidrógeno por contactos de Pt catalítico y deformación aplicada).

25 Shigekawa *et al* (2008) estudiaron las propiedades y la propagación de las ondas acústicas de superficie (SAW) en heteroestructuras de AlGaIn/GaN con polarización inversa hechas crecer sobre sustratos de zafiro (0001) al investigar las características de los filtros de SAW compuestos por transductores interdigitados (IDT) hechos de contactos óhmicos y Schottky interdigitales.

30 El documento CN 105424780 A divulgó un sensor de HEMT basado en GaN con una membrana funcionalizada en superficie para detectar un analito que está en contacto con la superficie del sensor y medir la concentración de analito. El espesor de la capa de arriba se ajusta de manera flexible con el fin de mejorar el rango de detección del sensor.

Compendio

35 La presente invención se define por un chip de sensor de identificación por radiofrecuencia (RFID) de onda acústica de superficie (SAW) basándose en una combinación de una estructura conductora de gas de electrones bidimensional (2DEG) o de gas de huecos bidimensional (2DHG) y un transductor de onda acústica de superficie (SAW) de acuerdo con la reivindicación 1, y un método correspondiente de acuerdo con la reivindicación 14. Las realizaciones de la invención se definen por las reivindicaciones dependientes. De acuerdo con la invención, el sensor contiene un sustrato piezoelectrónico, sobre el cual se deposita una estructura de heterounión multicapa. Esta estructura de heterounión comprende al menos dos capas, una capa separadora y una capa de barrera, en donde ambas capas se hacen crecer a partir de materiales semiconductores monocristalinos o policristalinos III-V. Se instalan transductores interdigitados (IDT), que transducen ondas acústicas de superficie, encima de la capa de barrera.

45 Un canal conductor que comprende un gas de electrones bidimensional (2DEG) o un gas de huecos bidimensional (2DHG) se forma en la superficie de separación entre las capas separadora y de barrera y puede proporcionar una corriente de electrones o de huecos en el sistema entre los electrodos de fuente y de drenador. En una realización particular, la estructura de heterounión puede ser una estructura de tres capas que consiste en dos capas separadoras y una capa de barrera apretada entre dichas capas separadoras como en un emparedado. Esto puede conducir a la formación del gas de huecos bidimensional (2DHG) en la capa separadora de arriba por encima de la capa de barrera, lo que da como resultado la inversión de la polaridad de la estructura.

50 Los contactos de fuente y de drenador acoplados capacitivamente (no óhmicos) están conectados al canal de 2DEG/2DHG formado y a metalizaciones eléctricas, en donde dichas metalizaciones se pueden colocar encima de la estructura y conectar esta a un circuito eléctrico del sensor. Se puede depositar una capa dieléctrica opcional encima de la estructura de heterounión. El área de puerta abierta de la estructura de 2DEG/2DHG se forma entre las áreas de fuente y de drenador como resultado de rebajar o hacer crecer la capa de arriba a un espesor específico.

55 Debido a que los contactos de fuente y de drenador son no óhmicos (es decir, están acoplados capacitivamente), la lectura de CC no se puede realizar. Para entrar eléctricamente en contacto con el canal de 2DEG/2DHG debajo, aproximadamente 5-20 nm por debajo de las metalizaciones, se ha de usar el régimen de frecuencia de CA. Dicho de otra forma, en este caso particular se deberían realizar la lectura de CA o las mediciones de impedancia de la corriente eléctrica que fluye a través del canal de 2DEG/2DHG. El acoplamiento capacitivo de los contactos de metal no óhmicos

con el canal de 2DEG/2DHG se induce normalmente a una frecuencia más alta que 30 kHz.

De acuerdo con la invención, el sustrato de heterounión multicapa de la presente solicitud se hace crecer a partir de materiales semiconductores monocristalinos o policristalinos III-V, en particular GaN/AlGa_N. En el caso específico del sustrato hecho crecer a partir de GaN/AlGa_N, se ha hallado, experimentalmente y de manera sorprendente, que se logra la sensibilidad más alta del sensor cuando el espesor de la capa rebajada de arriba (capa separadora de GaN o capa de barrera de AlGa_N) en el área de puerta abierta entre los contactos de fuente y de drenador es de 5-9 nm, preferiblemente 6-7 nm, más preferiblemente 6,2-6,4 nm. Este espesor de capa rebajada corresponde al rango de corriente pseudoconductor entre el modo de funcionamiento normalmente activo y normalmente inactivo del canal conductor de 2DEG/2DHG. Además, la rugosidad superficial de la capa rebajada de arriba dentro del área de puerta abierta entre los contactos de fuente y de drenador tiene una rugosidad de aproximadamente 0,2 nm o menos, preferiblemente 0,1 nm o menos, más preferiblemente 0,05 nm.

Además, en algunas realizaciones, la presente solicitud proporciona el sensor de RFID de SAW de potencia cero, que se basa en la heteroestructura de GaN/AlGa_N, y su uso en dispositivos ponibles hemodinámicos. En un ejemplo, El sensor es un sensor de potencia cero alimentado de forma remota con la energía de RF y codificado con RFID a través del método de codificación de frecuencia ortogonal (OFC).

Diversas realizaciones pueden permitir diversos beneficios, y se pueden usar junto con diversas aplicaciones. Los detalles de una o más realizaciones se exponen a continuación en los dibujos adjuntos y la descripción posterior. Otras características, objetos y ventajas de las técnicas descritas resultarán aparentes a partir de la descripción y los dibujos, y a partir de las reivindicaciones.

Breve descripción de los dibujos

Las realizaciones divulgadas se entenderán y apreciarán más completamente a partir de la siguiente descripción detallada, tomada junto con las figuras adjuntas. Los dibujos incluidos y descritos en la presente memoria son esquemáticos y no están limitando el alcance de la divulgación. También se observa que, en los dibujos, el tamaño de algunos elementos puede estar exagerado y, por lo tanto, puede no estar dibujado a escala con fines ilustrativos. Las dimensiones y las dimensiones relativas no corresponden necesariamente a puestas en práctica reales de la divulgación.

La **Figura 1** muestra esquemáticamente el pozo cuántico en tres condiciones de polarización diferentes:

Figura 1a: el potencial de puerta positivo ($+V_G$) es mucho más alto que el voltaje umbral (V_T),

Figura 1b: potencial de puerta de 0 V, y

Figura 1c: el potencial de puerta negativo ($-V_G$) está por debajo del voltaje umbral (V_T).

La **Figura 2** muestra esquemáticamente la dependencia de la corriente de fuente-drenador (una densidad de portadores de carga) inducida dentro del canal de 2DEG de un HEMT de GaN/AlGa_N con el espesor de la capa de barrera de AlGa_N rebajada en el área de puerta abierta.

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

La **Figura 4a** muestra la sensibilidad del PC-HEMT al fluido iónico para la capa de barrera de AlGa_N de 22 nm, hecha crecer normalmente y rebajada entonces a 6-7 nm.

La **Figura 4b** muestra la sensibilidad del PC-HEMT al fluido iónico para la capa de barrera de AlGa_N ultradelgada hecha crecer a 6-7 nm, rebajada entonces bajando a 5-6 nm y grabada con plasma.

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

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

La **Figura 6** muestra esquemáticamente la formación del canal conductor de 2DEG en la estructura de PC-HEMT de AlGa_N/Ga_N de tres capas de cara de N con una capa de Al(GaN)N ultradelgada para un confinamiento mejorado.

La **Figura 7a** muestra esquemáticamente el dispositivo de SAW basado en transductor interdigitado (IDT) de entrada.

La **Figura 7b** muestra esquemáticamente el IDT y sus parámetros característicos: longitud (L), ancho (W) y longitud de onda acústica (λ).

La **Figura 7c** muestra el ancho de banda (B) de la SAW como una función del número de IDT y la frecuencia (f), en donde f_0 es la frecuencia central.

La **Figura 8** muestra esquemáticamente un sensor de RFID de SAW de una realización con unos IDT de 2DEG en una heteroestructura de GaN/AlGaIn.

5 La **Figura 9** muestra esquemáticamente la topología básica del sensor de una realización, en donde las bandas (100) y (104) se asignan a estructuras de metal, tales como unos IDT de metal y electrodos de metal, respectivamente, las bandas (103) representan estructuras de 2DEG, la banda (102) muestra la estructura de tipo PC-HEMT y el área (de segundo plano) de color blanco (101) representa el sustrato de AlGaIn/GaN.

La **Figura 10** muestra esquemáticamente otra configuración de sensor de SAW de 2DEG topográfica básica de una realización. A la izquierda, la estructura de tipo PC-HEMT contiene una parte de 2DEG pseudoconductora principal (102) y una parte de 2DEG no rebajada (103). Los contactos óhmicos están representados por bandas (105).

10 La **Figura 11** muestra esquemáticamente otra configuración más del sensor de SAW de 2DEG de una realización. En esta configuración, las partes de la antena en serpentin para la señal y la carga a masa se separan al contraconectarse directamente entre sí a través de las líneas de 2DEG parásitas en la parte de arriba y en la parte de debajo del diseño mostrado.

15 La **Figura 12** muestra esquemáticamente una configuración adicional más del sensor de SAW de 2DEG. En esta configuración, la más simple, el área de 2DEG pseudoconductora (102) está cubriendo toda el área de IDT de emisor-receptor y está opcionalmente conectada a través de los contactos óhmicos (105) al electrodo de puerta (104) que, a su vez, está conectado a los IDT (100).

La **Figura 13** muestra esquemáticamente un sensor de RFID de SAW de potencia cero de una realización con una lectura remota.

20 La **Figura 14** muestra esquemáticamente un sensor optoelectrónico de una realización para una lectura remota.

Descripción detallada

25 En la siguiente descripción se describirán diversos aspectos de la presente solicitud. Con fines explicativos, se exponen configuraciones y detalles específicos con el fin de proporcionar una comprensión exhaustiva de la presente solicitud. Sin embargo, también será evidente para un experto en la materia 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 con el fin de no complicar la presente solicitud.

30 La expresión "comprendiendo/que comprende", usada en las reivindicaciones, es "abierta" y significa los elementos enumerados, o su equivalente en cuanto a estructura o función, más cualquier otro elemento o elementos que no se enumeren. Esta no se debería interpretar como restringida a los medios enumerados a continuación; no excluye otros elementos o etapas. Es necesario que se interprete como que especifica la presencia de los rasgos distintivos, elementos integrantes, etapas o componentes expuestos según se les hace referencia, pero no excluye la presencia o adición de otros uno o más rasgos distintivos, elementos integrantes, etapas o componentes, o grupos de los mismos. Por lo tanto, el alcance de la expresión "un dispositivo que comprende x y z" no se debería limitar a dispositivos que solo consisten en componentes x y z. Asimismo, el alcance de la expresión "un método que comprende las etapas x y z" no se debería limitar a métodos que consisten solo en estas etapas.

35 A menos que se exponga específicamente, como se usa en la presente memoria, la expresión "aproximadamente" se entiende como dentro de un rango de tolerancia normal en la técnica, por ejemplo dentro de dos desviaciones típicas de la media. En una realización, el término "aproximadamente" significa dentro del 10% del valor numérico notificado del número con el que se está usando este, preferiblemente dentro del 5% del valor numérico notificado. Por ejemplo, el término "aproximadamente" se puede entender inmediatamente como dentro del 10%, 9%, 8%, 7%, 6%, 5%, 4%, 3%, 2%, 1%, 0,5%, 0,1%, 0,05% o 0,01% del valor expuesto. En otras realizaciones, el término "aproximadamente" puede significar una tolerancia de variación más alta dependiendo, por ejemplo, de la técnica experimental usada. Dichas variaciones de un valor especificado son entendidas por los expertos y están dentro del contexto de la presente invención. Como una ilustración, se debería interpretar que un rango numérico de "aproximadamente 1 a aproximadamente 5" incluye no solo los valores explícitamente enunciados de aproximadamente 1 a aproximadamente 5, sino que también incluye valores individuales y subrangos dentro del rango indicado. Por lo tanto, en este rango numérico están incluidos valores individuales tales como 2, 3 y 4 y subrangos, por ejemplo de 1 a 3, de 2 a 4 y de 3 a 5, así como 1, 2, 3, 4, 5 o 6, individualmente. Este mismo principio se aplica a rangos que enuncian solo un valor numérico como un mínimo o un máximo. A menos que sea de otro modo obvio a partir del contexto, todos los valores numéricos proporcionados en la presente memoria están modificados por el término "aproximadamente". Otros términos similares, tales como "sustancialmente", "generalmente", "hasta" y similares se han de interpretar como que modifican una expresión o valor de tal modo que este no sea un valor absoluto. Tales expresiones estarán definidas por las circunstancias y las expresiones que estas modifiquen, según sean entendidas esas expresiones por los expertos en la materia. Esto incluye, como mínimo, el grado de error experimental, error técnico y error instrumental esperado para un experimento, técnica o instrumento dado usado para medir un valor.

Como se usa en la presente memoria, la expresión "y/o" incluye todas y cada una de las combinaciones de uno o más de los elementos enumerados asociados. A menos que se defina de otro modo, todas las expresiones (incluyendo

expresiones científicas y técnicas) usadas en la presente memoria tienen el mismo significado que el conocido comúnmente por un experto en la materia a la que pertenece la presente invención. Se entenderá adicionalmente que se debería interpretar que expresiones tales como las definidas en diccionarios de uso común tienen un significado que es consistente con su significado en el contexto de la memoria descriptiva y la técnica relevante, y no se deberían interpretar en un sentido idealizado o demasiado formal a menos que se defina así expresamente en la presente memoria. Funciones o construcciones bien conocidas pueden no describirse en detalle por brevedad y/o claridad.

Se entenderá que, cuando se hace referencia a un elemento como que está "sobre", "unido a", "conectado a", "acoplado con", "en contacto con", etc., otro elemento, este puede estar directamente sobre, unido a, conectado a, acoplado con o en contacto con el otro elemento, o también pueden estar presentes elementos intermedios. En contraposición, cuando se hace referencia a un elemento como que está, por ejemplo, "directamente sobre", "directamente unido a", "directamente conectado a", "directamente acoplado" con o "directamente en contacto con" otro elemento, no hay presente elemento intermedio alguno. Los expertos en la materia también apreciarán que las referencias a una estructura o característica que esté dispuesta "adyacente a" otra característica pueden tener porciones que estén superpuestas o subyacentes a la característica adyacente.

El transistor de movilidad de electrones alta dopado de polarización (HEMT) es un transistor de efecto de campo (FET) en el que dos capas de campo de polarización y banda prohibida diferente se hacen crecer una sobre otra formando la estructura de heterounión. En un aspecto, el sensor de la presente solicitud contiene un sustrato piezoeléctrico que comprende la estructura de heterounión multicapa de tipo HEMT. Esta estructura se basa esencialmente en al menos dos capas de materiales semiconductores III-V, tales como nitruro de galio (GaN) y nitruro de aluminio y galio (AlGaIn). Como consecuencia de la discontinuidad en el campo de polarización, se crean cargas superficiales en la superficie de separación 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. Debido a que los electrones de canal están confinados en un pozo cuántico en una región espacial infinitamente estrecha en la superficie de separación entre las capas, estos electrones se denominan gas de electrones bidimensional (2DEG). Este confinamiento especial de los electrones de canal en el pozo cuántico les otorga en realidad unas características bidimensionales, que potencian fuertemente su movilidad superando la movilidad masiva del material en el que están fluyendo los electrones.

Las **Figuras 1a-1c** muestran esquemáticamente el pozo cuántico a tres condiciones de polarización diferentes comenzando por el potencial de puerta positivo (V_G), mucho más alto que el voltaje umbral (V_T), y bajando al potencial de puerta de 0 V y más allá a los valores negativos por debajo del voltaje umbral. El V_T se define como un voltaje que se requiere para rellenar con electrones la superficie de separación entre la capa de GaN y las capas de AlGaIn, creando así una conductividad del canal de 2DEG. Debido a que los electrones de canal de 2DEG ocupan niveles de energía por debajo del nivel de Fermi, el nivel de Fermi en un pozo cuántico se ubica por encima de varios niveles de energía cuando $V_G \gg V_T$ (**Figura 1a**). Esto posibilita una población alta de electrones de canal y, en consecuencia, una conductividad alta. El canal de 2DEG está activo en este caso. Sin embargo, cuando V_G disminuye a 0 V (**Figura 1b**), el nivel de Fermi también cae con respecto al pozo cuántico. Como resultado, se rellenan muchos menos niveles de energía de electrones y la cantidad de los electrones de canal de 2DEG disminuye significativamente. Cuando V_G es mucho menor que V_T (**Figura 1c**), todos los niveles de energía de electrones están por encima del nivel de Fermi, y no hay electrones de 2DEG debajo de la puerta. Esta situación se llama "agotamiento de canal" y el canal está inactivo.

Muchos HEMT comercialmente disponibles basándose en las capas de materiales semiconductores III-V tienen un valor negativo de V_T , dando como resultado un modo de funcionamiento "normalmente activo" a un potencial de puerta de 0 V. Estos se denominan transistores semiconductores de "modo de agotamiento" y se usan en diversas aplicaciones de conmutación de potencia cuando se ha de aplicar el voltaje negativo sobre la puerta con el fin de bloquear la corriente. Sin embargo, para un funcionamiento seguro a un voltaje alto o una densidad de potencia alta, con el fin de reducir la complejidad de circuito y eliminar el consumo de potencia en espera, se prefieren los transistores con características "normalmente inactivas". Los voltajes altos y las velocidades de conmutación altas permiten fabricar unos dispositivos más pequeños y más eficientes, tales como electrodomésticos, comunicaciones y automóviles. Para controlar la densidad de electrones en el canal de 2DEG y para conmutar el HEMT a activo y e inactivo, el voltaje en la puerta del transistor normalmente está regulado.

Se han notificado varias técnicas para fabricar las estructuras de semiconductores normalmente inactivas. Burnham *et al* (2010) propusieron estructuras normalmente inactivas del tipo de puerta rebajada. En esta estructura, la capa de barrera de AlGaIn se graba y la puerta se acerca a la superficie de separación entre la capa de barrera de AlGaIn y la capa separadora de GaN. A medida que la puerta se aproxima a la superficie de separación entre las capas, el V_T aumenta. Por lo tanto, el funcionamiento normalmente inactivo del canal conductor de 2DEG se logra una vez que la región de agotamiento alcanza la superficie de separación y agota el canal de 2DEG a un voltaje de puerta cero. Las principales ventajas de estas estructuras son unos circuitos de accionamiento de consumo de potencia relativamente más bajo, de ruido más bajo y más simples. Estos se usan actualmente, por ejemplo, en comunicaciones de microondas y de ondas milimétricas, formación de imágenes y radares.

Chang *et al* (2009) propusieron, en lugar de grabar la capa de barrera relativamente gruesa para aproximarse a la superficie de separación de AlGaIn/GaN, usar una barrera de AlGaIn muy delgada. Esta estructura también logra el

funcionamiento normalmente inactivo del canal de 2DEG al aproximarse a la puerta hacia la superficie de separación de AlGaIn/GaN. Chen *et al* (2010) propusieron usar el método de tratamiento con plasma basado en flúor. Aunque muchas publicaciones han adoptado diversos métodos para lograr dispositivos normalmente inactivos con un impacto mínimo sobre la corriente de drenador, lamentablemente estas sacrificaron el rendimiento de activación de dispositivo.

5 La **Figura 2** muestra la dependencia de la corriente de fuente-drenador (una densidad de portadores de carga) con el espesor de capa de barrera rebajado en el área de puerta abierta. Como se ve a partir de la figura, las estructuras que tienen un espesor de la capa de barrera en el área de puerta abierta más grande que 9 nm forman canales de 2DEG normalmente activos. En tales estructuras, Debido a los efectos de polarización inherentes presentes en los materiales III-V, se induce una lámina delgada de cargas en la parte de arriba y en la parte de debajo de las superficies de separación de la capa de barrera. Como resultado, se induce un campo eléctrico alto en la capa de barrera, y los estados de donador de superficie en la superficie de separación de arriba comienzan a donar electrones para formar el canal de 2DEG en la proximidad de la superficie de separación de heterounión sin la aplicación de una polarización de puerta. Por lo tanto, estas estructuras actúan como dispositivos normalmente activos. Por otro lado, las estructuras que tienen un espesor de la capa de barrera en el área de puerta abierta inferior a aproximadamente 5 nm actúan como dispositivos normalmente inactivos.

La presente solicitud describe realizaciones de un sensor microelectrónico o chip de sensor basándose en una combinación de una estructura de gas de electrones bidimensional (2DEG) o de gas de huecos bidimensional (2DHG) y un transductor de onda acústica de superficie (SAW). En algunas realizaciones, el sensor puede contener un sustrato piezoeléctrico, sobre el cual se puede depositar la estructura de heterounión multicapa. Esta estructura de heterounión comprende al menos dos capas, una capa separadora y una capa de barrera, en donde ambas capas se hacen crecer a partir de los materiales semiconductores monocristalinos o policristalinos III-V mencionados anteriormente. Se pueden instalar transductores interdigitados (IDT), que transducen ondas acústicas de superficie, encima de la capa de barrera. La estructura de heterounión multicapa de la presente solicitud se hace crecer a partir de cualquier material semiconductor monocristalino o policristalino III-V disponible, tal como GaN/AlGaIn. En el caso específico del sustrato hecho crecer a partir de GaN/AlGaIn, se ha hallado, experimentalmente, que se logra la sensibilidad más alta del sensor cuando el espesor de la capa rebajada de arriba (capa separadora de GaN o capa de barrera de AlGaIn) en el área de puerta abierta entre los contactos de fuente y de drenador es de 5-9 nm, preferiblemente 6-7 nm, más preferiblemente 6,2-6,4 nm. Además, también se ha hallado que el sensor exhibe su sensibilidad más alta cuando la rugosidad superficial de la capa rebajada de arriba es de aproximadamente 0,2 nm o menos, preferiblemente 0,1 nm o menos, más preferiblemente 0,05 nm.

Por lo tanto, la capa de arriba rebajada o hecha crecer en el área de puerta abierta a 5-9 nm se ha de optimizar para potenciar significativamente la sensibilidad del sensor. De manera sorprendente, se halló que este espesor específico de la capa de barrera corresponde al rango de corriente "pseudoconductor" entre los modos de funcionamiento normalmente activo y normalmente inactivo normalmente del canal de 2DEG y requiere una explicación adicional.

35 El rango de corriente "pseudoconductor" (para distinguirla de la normalmente conductora) del canal de 2DEG se define como un rango de funcionamiento del canal entre sus modos de funcionamiento normalmente activo y normalmente inactivo. Los "estados de trampa" son estados en la banda prohibida de un semiconductor que atrapan un portador hasta que este se recombina. Los "estados de superficie" son estados causados por la reconstrucción de superficie del cristal local debido a la tensión superficial causada por algunos defectos, dislocaciones o la presencia de impurezas en el cristal. Tal reconstrucción de superficie crea a menudo "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 de tipo aceptor, logrando una carga negativa cuando están ocupados. Sin embargo, los estados de trampa de superficie con energía por debajo del nivel de Fermi son de tipo donador y están cargados positivamente cuando están vacíos y neutros cuando están ocupados. Se considera que estos estados de trampa de superficie de tipo donador son la fuente de electrones en la formación del canal de 2DEG. Estos pueden poseer una distribución amplia de energías de ionización dentro de la banda prohibida y son causados por reacciones redox, enlaces colgantes y huecos en la capa de superficie. Siempre existe un equilibrio entre la densidad de canal de 2DEG y el número de donadores de superficie ionizados que es regido por la neutralidad de carga y la continuidad del campo eléctrico en las superficies de separación.

Por lo tanto, las trampas de superficie de tipo donador en la superficie de la capa de barrera son una de las fuentes más importantes del 2DEG en el canal. Sin embargo, esto solo se aplica para un espesor de capa de barrera específico. En una capa de 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 capa de barrera, la energía del estado de trampa de superficie se aproxima a la energía de Fermi hasta que esta coincide con la misma. El espesor de la capa de 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 campo eléctrico inducido por polarización fuerte hallado en la barrera para formar el 2DEG instantáneamente.

Si los estados de trampa de superficie están completamente agotados, un aumento adicional en el espesor de capa de barrera no aumentará la densidad de 2DEG. En realidad, si la capa de canal de 2DEG no logra estirar la capa de barrera, esta última simplemente se relajará. Tras la relajación de la capa de barrera, se crean muchos defectos de

crystal en la superficie de separación entre las capas separadora y de barrera, y la polarización piezoeléctrica desaparece instantáneamente causando un deterioro en la densidad de 2DEG.

Con el fin de ilustrar el fenómeno anterior de la corriente pseudoconductor, se hace referencia a continuación a las **Figuras 2 y 3**. Como se ha descrito anteriormente, la **Figura 2** muestra la dependencia de la corriente de fuente-drenador (una densidad de portadores de carga) con el espesor de capa de barrera de AlGaIn rebajada. El equilibrio de energía entre los estados de trampa de superficie de donador y la barrera de túnel de AlGaIn conduce a la formación de 2DEG (neutralidad de carga combinada con el nivel de energía más bajo) en la discontinuidad de banda de conducción. Como se ha explicado anteriormente, la disminución en el espesor de la capa de 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 efecto túnel electrónico desde la superficie al 2DEG, se desvían por debajo del nivel de Fermi, minimizando así el suministro de electrones al canal de 2DEG. Esta situación teórica se ilustra adicionalmente en la **Figura 3**. Por lo tanto, el rebaje de la capa de AlGaIn de 9 nm a 5 nm conduce a una caída enorme en la conductividad del gas de electrones bidimensional de seis órdenes de magnitud.

Por lo tanto, el mecanismo del agotamiento de 2DEG basándose en el rebaje de la capa de barrera depende fuertemente de los estados de trampa de superficie de tipo donador (o la carga superficial total). A medida que disminuye el espesor de la capa de barrera, se necesita aplicar menos carga externa adicional a la superficie de capa de barrera con el fin de agotar el canal de 2DEG. Hay un espesor de barrera crítico (lo más pequeño), cuando el canal de 2DEG está mayormente agotado pero sigue siendo altamente conductor debido a una combinación de la barrera de energía y la energía de estados de trampa de superficie de donador. A 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 al agotamiento de 2DEG, muy fuerte. Como resultado, la superficie de la capa de barrera a este espesor crítico es extremadamente sensible a cualquier cambio, por pequeño que sea, en el campo eléctrico de los alrededores.

Por lo tanto, el rebaje de la capa de barrera desde 9 nm bajando a 5 nm redujo significativamente la densidad de 2DEG, llevó el sensor al funcionamiento de "umbral cercano" y resultó en una sensibilidad a la carga superficial altamente aumentada. El espesor de 5-9 nm específico de la capa de barrera responsable del comportamiento pseudoconductor del canal de 2DEG da al sensor una sensibilidad increíble.

Por ejemplo, la estructura de heterounión con una capa de AlGaIn hecha crecer de 22 nm, sometida a una activación de plasma corta (60 s) y rebajada a 6-7 nm, se compara con la estructura de heterounión de 6-7 nm ultradelgada que tiene la capa de barrera de AlGaIn rebajada a 5-6 nm y grabada con plasma durante 450 s. En el primer caso, inicialmente no se rebaja la capa de barrera de AlGaIn, sino que, en su lugar, la capa de SiN de 2-3 nm (conocida como "capa de recubrimiento de GaN") se agrieta y los estados de superficie se ionizan. La capa de barrera de AlGaIn en el segundo caso se rebaja bajando a 6,3 nm y se graba con plasma durante 450 s. Como se muestra en las **Figuras 4a y 4b**, se halló que la diferencia en la sensibilidad entre las dos estructuras estaba casi 10^3 veces a favor de la estructura rebajada.

Además del espesor de capa de barrera de arriba rebajada o hecha crecer, la rugosidad de la superficie de capa de barrera es otro parámetro muy importante que no se ha divulgado previamente. De manera sorprendente, se ha hallado que la rugosidad de la superficie de capa de barrera de AlGaIn de arriba (en el área sensible de puerta abierta) 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 de barrera de AlGaIn de arriba en el área de puerta abierta y una rugosidad fuertemente reducida de su superficie hacen que el sensor sea increíblemente sensible.

En un aspecto adicional, la estructura de heterounión puede ser una estructura de tres capas que consiste en dos capas separadoras y una capa de barrera apretada entre dichas capas separadoras como en un emparedado, en donde la capa de arriba es una capa separadora. Esto puede conducir a la formación del gas de huecos bidimensional (2DHG) en la capa separadora de arriba por encima de la capa de barrera, lo que da como resultado la inversión de la polaridad del transistor en comparación con la estructura de dos capas analizada anteriormente.

En general, la polaridad de los materiales semiconductores de nitruro III-V afecta fuertemente al rendimiento de los transistores basándose en estos semiconductores. La calidad de los materiales de GaN de wurtzita se puede variar mediante su polaridad, debido a que 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 superficie. La aparición del 2DEG/2DHG y las propiedades ópticas de las estructuras de heterounión de materiales basados en nitruro están influenciadas por los efectos de campo interno causados por polarizaciones espontáneas y piezoeléctricas. Los dispositivos en todos los materiales de nitruro III-V se fabrican sobre superficies polares {0001}. En consecuencia, sus características dependen de si las capas de GaN exhiben polaridad positiva de cara de Ga o polaridad negativa de cara de N. Dicho de otra forma, como resultado de la polaridad de materiales de GaN de wurtzita, cualquier capa de GaN tiene dos superficies con polaridades diferentes, una superficie polar Ga y una superficie polar N. Una superficie polar 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 superficie está unido a tres átomos de N en la dirección alejada de la superficie. En contraposición, 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 superficie también está unido a tres átomos de Ga en la dirección alejada de la superficie. Por lo tanto, las estructuras de polaridad de cara de N tienen la polaridad inversa a las estructuras de polaridad de cara de Ga.

5 Como se ha descrito anteriormente para la estructura de heterounión de dos capas, la capa de barrera siempre se coloca encima de la capa separadora. Por lo tanto, la capa que se rebaja es la capa de barrera, específicamente la capa de AlGaIn. Como resultado, debido a que el 2DEG se usa como el canal conductor y este canal conductor se ubica ligeramente por debajo de la capa de barrera (en una región más gruesa de la capa separadora de GaN), la estructura de heterounión se hace crecer a lo largo de la dirección {0001} o, dicho de otra forma, con la polaridad de
10 cara de Ga. Sin embargo, como se ha explicado anteriormente, el mecanismo físico que conduce a la formación del 2DEG es una discontinuidad de polarización en la superficie de separación de AlGaIn/GaN, reflejado por la formación de las cargas de superficie de separación fijas inducidas por polarización que atraen portadores libres para formar un gas portador bidimensional. Esta es una carga de polarización positiva en la superficie de separación de AlGaIn/GaN que atrae electrones para formar 2DEG en la capa de GaN ligeramente debajo de esta superficie de separación.

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

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

Polaridad de cara de Ga

1) La polaridad de cara de Ga se caracteriza por la formación de 2DEG en la capa de GaN debajo de la capa de barrera de AlGaIn. Esta es en realidad la misma configuración de dos capas que se ha descrito anteriormente, pero
25 con la adición de la capa de GaN de arriba. En esta configuración, la capa de barrera de AlGaIn y las dos capas separadoras de GaN han de ser nominalmente no dopadas o dopadas de tipo n.

2) En otra configuración de cara de Ga que se muestra en la **Figura 5a**, con el fin de formar el canal conductor que comprende un gas de huecos bidimensional (2DHG) en la capa de GaN de arriba por encima de la capa de barrera de AlGaIn en la configuración, la capa de barrera de AlGaIn debería ser dopada de tipo p (por ejemplo, con Mg o Be como aceptor) y la capa separadora de GaN también debería ser dopada de tipo p con Mg, Be o intrínseca.

30 *Polaridad de cara de N*

3) La polaridad de cara de N se caracteriza por la formación de 2DEG en la capa de GaN de arriba, arriba de la capa de barrera de AlGaIn, como se muestra en la **Figura 5b**. En este caso, la capa de barrera de AlGaIn y las dos capas separadoras de GaN han de ser nominalmente no dopadas o dopadas de tipo n.

4) La última configuración supone que el canal conductor de 2DHG se forma en la capa de GaN separadora debajo
35 de la capa de barrera de AlGaIn. La capa de GaN de arriba puede estar presente (estructura de tres capas) o no (estructura de dos capas) en este caso. La capa de barrera de AlGaIn ha de ser dopada de tipo p (por ejemplo, con Mg o Be como aceptor) y la capa de GaN de debajo también debería ser dopada de tipo p con Mg, Be o intrínseca.

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

40 A. Heteroestructura de GaN/AlGaIn/GaN de **cara de Ga** con el 2DEG formado en la capa separadora de GaN por debajo de la capa de barrera de AlGaIn. En este caso, la capa de GaN de arriba se puede omitir para obtener la estructura de dos capas. Para la estructura de tres capas, la capa de GaN de arriba se ha de rebajar a un espesor de 1-9 nm en el área de puerta abierta o hacer crecer con este espesor bajo, con la rugosidad por debajo de 0,2 nm, y el espesor de la barrera de AlGaIn se puede ajustar apropiadamente durante el crecimiento.

45 B. Heteroestructura de GaN/AlGaIn/GaN de **cara de Ga** con el canal conductor de 2DHG formado en la capa de GaN de arriba por encima de la capa de barrera de AlGaIn. La capa de GaN de arriba se ha de rebajar a un espesor de 5-9 nm en el área de puerta abierta con la rugosidad por debajo de 0,2 nm, y el espesor de la capa de barrera de AlGaIn se puede ajustar apropiadamente. Se han de ajustar las concentraciones de dopaje de tipo p de la capa de GaN y la barrera de AlGaIn; se ha de entrar en contacto con el 2DHG (en el caso ideal, por contactos óhmicos).

50 C. Heteroestructura de GaN/AlGaIn/GaN de **cara de N** con el 2DEG en la capa de GaN de arriba por encima de la capa de barrera de AlGaIn. La capa de GaN de arriba se ha de rebajar a un espesor de 5-9 nm en el área de puerta abierta con la rugosidad por debajo de 0,2 nm. El espesor de la barrera de AlGaIn se puede ajustar durante el crecimiento. Se han de ajustar los niveles de dopaje de tipo n de la capa separadora de GaN y la capa de barrera de AlGaIn; se ha de entrar en contacto con el 2DEG (en el caso ideal, por contactos óhmicos).

D. Heteroestructura de GaN/AlGaIn/GaN de **cara de N** con el 2DHG en la capa separadora de GaN por debajo de la capa de barrera de AlGaIn. En este caso, la capa de GaN de arriba se puede omitir para obtener la estructura de dos capas. En las configuraciones tanto de dos capas como de tres capas, la capa de GaN de arriba se ha de rebajar a un espesor de 1-9 nm en el área de puerta abierta con la rugosidad por debajo de 0,2 nm, y el espesor de la barrera de AlGaIn se puede ajustar apropiadamente.

En todas las estructuras anteriores, la deposición de una capa dieléctrica encima podría ser beneficiosa o incluso necesaria para obtener un mejor confinamiento (como en el caso de las estructuras de cara de N). Como se muestra en la **Figura 6**, para la estructura "C" anterior, puede ser aún más beneficioso incluir una capa de barrera de AlN o AlGaIn ultradelgada (de aproximadamente 1 nm) con un contenido de Al alto encima del canal de 2DEG para mejorar el confinamiento.

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

Otra característica importante del sensor de la presente solicitud es que se realiza una conexión eléctrica de la estructura de heterounión al canal de 2DEG o 2DHG mediante un acoplamiento capacitivo a las metalizaciones eléctricas a través de un contacto de barrera Schottky. El "acoplamiento capacitivo" se define como una transferencia de energía dentro del mismo circuito eléctrico o entre diferentes circuitos eléctricos por medio de corrientes de desplazamiento inducidas por campos eléctricos existentes entre nodos de un circuito o 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 los mismos es directamente proporcional al voltaje. Sin embargo, los contactos no óhmicos no siguen la misma relación lineal de la ley de Ohm. Dicho de otra forma, la corriente eléctrica que pasa a través de contactos no óhmicos no es linealmente proporcional al voltaje. En su lugar, esta da una curva pronunciada con un gradiente creciente, debido a que, en ese caso, la resistencia aumenta a medida que aumenta la corriente eléctrica, dando como resultado un aumento del voltaje al atravesar contactos no óhmicos. Esto es debido a que los electrones portan más energía y, cuando chocan con átomos en el canal conductor, estos transfieren más energía creando nuevos estados vibracionales de alta energía, aumentando así la resistencia y la temperatura.

Cuando las metalizaciones eléctricas se colocan sobre material semiconductor monocristalino o policristalino, se produce el "contacto de Schottky" o el "contacto de barrera de Schottky" entre el metal y el semiconductor. La energía de este contacto está cubierta por la regla Schottky-Mott, que predice que la barrera de energía entre un metal y un semiconductor será proporcional a la diferencia de la función de trabajo de metal-vacío y la afinidad electrónica de semiconductor-vacío. Sin embargo, este es un comportamiento teórico ideal, mientras que, en realidad, la mayoría de las superficies de separación entre un metal y un semiconductor siguen esta regla solo hasta cierto punto. La frontera de un cristal semiconductor terminada abruptamente por un metal crea estados de electrones nuevos dentro de su banda prohibida. Estos estados de electrones nuevos 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 de 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 banda, se formaría preferiblemente el contacto de Schottky. Sin embargo, si el nivel de Fermi está cerca del borde de banda, preferiblemente se formaría un contacto óhmico. El contacto de barrera Schottky es un contacto no óhmico rectificador que, en realidad, es casi independiente de las funciones de trabajo de semiconductor o de metal.

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

Debido a que los contactos de fuente y de drenador son no óhmicos (es decir, están acoplados capacitivamente), la lectura de CC no se puede realizar. Para entrar eléctricamente en contacto con el canal de 2DEG/2DHG debajo, aproximadamente 5-20 nm por debajo de las metalizaciones, se ha de usar el régimen de frecuencia de CA. Dicho de otra forma, en este caso particular se deberán realizar la lectura de CA o las mediciones de impedancia de la corriente eléctrica que fluye a través del canal de 2DEG/2DHG. El acoplamiento capacitivo de los contactos de metal no óhmicos con el canal de 2DEG/2DHG se vuelve posible solo si se aplica a las metalizaciones una frecuencia de CA suficientemente alta, más alta que 30 kHz. En resumen, las metalizaciones eléctricas, que se acoplan capacitivamente al canal de 2DEG/2DHG, 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 de 2DEG/2DHG accionado en el modo de frecuencia de CA a través del contacto de Schottky como se ha explicado anteriormente.

Los resonadores de onda acústica de superficie (SAW) son una clase de MEMS basándose en la modulación de ondas acústicas de superficie. El mecanismo de detección para los resonadores de SAW utiliza cambios en la amplitud,

velocidad o fase de una SAW que se propaga a lo largo del sustrato debido a cambios en las características de la trayectoria de propagación. En general, la energía de la SAW se concentra normalmente en una región de superficie con un espesor de menos de 1,5 veces su longitud de onda. Por lo tanto, el resonador de SAW es extremadamente sensible a su entorno.

- 5 El principio del sensor de SAW basado en transductor interdigitado (IDT) se muestra en las **Figuras 7a-7c**. Un par de IDT, fabricados sobre el sustrato de GaN/AlGaIn, sirve como puertos de entrada y salida de las señales. La fabricación de los sensores de SAW comprende selección de materiales, dibujo de patrones, corte en pastillas, funcionalización y encapsulado final.

- 10 En general, los sensores de SAW se diseñan al elegir la frecuencia y el ancho de banda de funcionamiento deseados. La SAW se puede expresar como un valor complejo $\gamma = \alpha + i\beta$, en donde la constante de atenuación α y la constante de propagación $\beta = 2\pi/\lambda$ son parámetros de diseño importantes del sensor de SAW (λ es la longitud de onda acústica). Otro parámetro de diseño importante es el coeficiente de acoplamiento electromecánico K^2 , que es una medida de la eficiencia para convertir una señal de microondas de aplicación en energía mecánica. Estos parámetros determinarán la magnitud de los cambios observados en la velocidad de fase de SAW y en la atenuación de la intensidad de SAW.

- 15 Como se muestra en las **Figuras 7b-7c**, la frecuencia de funcionamiento del sensor de SAW f_0 se puede elegir al elegir apropiadamente la separación de dedos interdigital d de tal modo que $f_0 = v/d$, en donde v es la velocidad de propagación de onda en el sustrato específico. En consecuencia, las dimensiones del sensor de SAW diseñado dependen de la frecuencia de funcionamiento elegida, que puede variar de un micrómetro para 1-10 GHz a milímetros para el funcionamiento de kHz-MHz. Los sensores de SAW que funcionan en el rango de GHz se pueden diseñar prontamente e integrar fácilmente con circuitos de RF, la diversidad de circuitos MMIC y circuitos de microbandas para una detección remota inalámbrica de baja potencia. El ancho de banda de la onda acústica viene dado por $B = v/2Nd$, en donde N es la cantidad de dedos interdigitales, como se muestra en la **Figura 7b**.

- 25 Los sistemas basados en GaN/AlGaIn mencionados anteriormente son materiales casi ideales para los sensores de SAW debido a su alta velocidad de propagación de SAW de aproximadamente 4000 m/s, altos coeficientes de acoplamiento electromecánico y su compatibilidad con la integración electrónica de RF. Estos materiales también muestran una excelente resistencia a la humedad y grabado químico. Las heteroestructuras de GaN/AlGaIn descritas anteriormente exhiben un efecto piezoeléctrico fuerte y se han usado para fabricar las microbalanzas de SAW ultrasensibles, aprovechando la influencia de la acumulación másica sobre la propagación de SAW. Los coeficientes de acoplamiento electromecánico altos del sustrato de GaN/AlGaIn ($K_{ef}^2 = 0,001-0,002$), en combinación con la pérdida acústica baja y la velocidad alta de SAW, posibilitan su uso en aplicaciones de RF de pérdida baja diversas y alta frecuencia. Por lo tanto, Los resonadores y sensores de SAW basados en GaN/AlGaIn que funcionan hasta el rango de 10 GHz se pueden diseñar e integrar con cualquier aplicación de detección remota inalámbrica.

- 35 Por lo tanto, el uso de la heteroestructura de GaN/AlGaIn como sustrato piezoeléctrico para los sensores de SAW puede dar como resultado una mejora considerable del límite de detección y una selectividad alta. Esto es un resultado de la sensibilidad del 2DEG/2DHG a cualquier carga superficial proximal y una sensibilidad de masa alta, como se ha explicado anteriormente. Por lo tanto, las heteroestructuras de GaN/AlGaIn y los diodos Schottky se pueden integrar con un sensor de SAW para crear un dispositivo de ajuste de SAW resonante bastante singular con una pérdida acústica baja, un rendimiento de RF de pérdida baja y frecuencia alta. El 2DEG/2DHG en una estructura de GaN/AlGaIn y en una trayectoria de propagación de SAW interacciona con el campo eléctrico lateral, dando como resultado una pérdida óhmica, que atenúa y ralentiza la SAW. Este mecanismo se puede usar para ajustar la velocidad de propagación de SAW.

- 45 Sin embargo, combinar para el 2DEG/2DHG con la SAW logrando una efectividad sensorial máxima, se han de tener en cuenta algunos aspectos físicos. La combinación funcional real de la 2DEG/2DHG con la SAW requiere una retirada completa o parcial, agotamiento o dibujo de patrones apropiado del 2DEG/2DHG en el canal de pozo cuántico en la región de propagación de ondas acústicas. La conductividad de carga alta en el canal de 2DEG/2DHG conductor puede apantallar el campo eléctrico y reducir las transducciones electroacústicas en los IDT.

- 50 Los IDT metálicos introducen efectos de carga másica inherentes e interferencia de tránsito triple (TTI), reduciendo la relación de señal a ruido. En los sensores de SAW convencionales, la velocidad de propagación de SAW promedio bajo los IDT metálicos se reducirá con respecto al valor de superficie libre y dará como resultado una reducción de su frecuencia central con un aumento de amplitud y ondulación de fase al atravesar el paso de banda debido a la reflexión de señal a partir de los IDT metálicos.

- 55 Los problemas anteriormente mencionados se pueden superar en la práctica mediante el uso de los dedos de IDT basados en 2DEG o 2DHG al tiempo que también se aumenta la sensibilidad de sensor. Las características de radiofrecuencia (RF) del dispositivo de SAW con unos IDT de 2DEG/2DHG planos son casi iguales a las de aquellos que usan unos IDT metálicos con contacto de Schottky. Además, los efectos de carga másica y el TTI se suprimen cuando se usan los transductores basados en 2DEG/2DHG en lugar de unos IDT metálicos. Asimismo, el área de detección del resonador o sensor de SAW puede estar justo encima de los IDT de 2DEG/2DHG planos en lugar de en un área de propagación de SAW separada entremedias de los IDT. La **Figura 8** muestra esquemáticamente un sensor con unos IDT de 2DEG/2DHG en una heteroestructura de GaN/AlGaIn.

En general, cuando unos IDT metálicos se colocan sobre material semiconductor microcristalino, se forma el contacto de Schottky entre el metal y el semiconductor, como se ha explicado anteriormente (con respecto a los contactos no óhmicos). Considerando el mecanismo de sensibilidad a la carga en la SAW basada en 2DEG/2DHG, se pueden añadir otras áreas de 2DEG/2DHG sensibles a la carga que funcionan o bien en la frecuencia central resonante o bien en otros modos resonantes. Estas áreas de 2DEG/2DHG adicionales con dibujo de patrones potenciarán adicionalmente los cambios resonantes en el sensor de SAW principal a través de su control por puerta de carga. Al estudiar las diferentes formas de señal para diferentes modos resonantes, se puede introducir una detección selectiva. Además de los IDT de 2DEG/2DHG sensibles a la carga, otros elementos de 2DEG/2DHG funcionales, tales como, por ejemplo, un diodo Schottky de 2DEG/2DHG y un diodo no simétrico plano de 2DEG/2DHG, nanohilos y transistores de movilidad de electrones alta se pueden colocar entre y conectar con unos IDT de entrada y salida que funcionan en un modo de filtro resonante, como se ilustra en la **Figura 8**. Las características eléctricas de tales elementos funcionales se modulan debido a la transducción electroacústica, que está correlacionada con el tiempo (sincronizada con unos IDT). Esto da como resultado una pérdida eléctrica mínima y una forma de señal específica para la resonancia de SAW. A través del control por puerta de campo electrostático, por ejemplo por procesos redox que ocurren en la superficie, este modo de filtro de SAW resonante se ve fácilmente afectado (frecuencia, amplitud).

Por lo tanto, debido a su naturaleza piezoeléctrica, la estructura de heterounión de AlGaIn/GaN se puede usar con éxito como sensores de SAW en la membrana de AlGaIn/GaN independiente. El uso de los sensores basados en 2DEG/2DHG dentro de la configuración SAW posibilita una combinación de sensibilidad ultra alta con una estabilidad de señal excelente. Es bien sabido que los sensores de SAW son muy sensibles a las cargas superficiales en la trayectoria de propagación de SAW entre los IDT o electrodos de dedo de emisor y receptor. Además, los sensores de SAW tienen un factor Q muy alto a la frecuencia resonante. Los sensores basados en 2DEG/2DHG aumentan un efecto electroacústico de campo cercano evanescente a través de la capacidad de respuesta de carga de densidad de 2DEG/2DHG, seguido de un aumento drástico de la sensibilidad a las cargas eléctricas proximales. Además, los sensores de SAW pueden ser alimentados fácilmente por un campo de RF con la frecuencia correspondiente teniendo una antena basada en serpentín apropiada. El sensor de SAW ofrece la integración de RFID intrínseca mediante el uso de la codificación de frecuencia ortogonal.

Existe una gran diversidad funcional de las topologías y diseños de sensor de RFID de SAW de 2DEG/2DHG. El objetivo de la topología de sensor de SAW de 2DEG/2DHG es lograr una influencia lo más grande del parámetro de transferencia S₂₁ de transductor de SAW sin sacrificar la estabilidad de sensor. La topología básica del sensor de la presente invención se muestra esquemáticamente en la **Figura 9**. Las bandas oscuras (100) y (104) en la **Figura 9** se asignan a estructuras de metal, tales como unos IDT de metal (100) y electrodos de metal (104), respectivamente, las bandas a rayas ligeras (103) representan estructuras de 2DEG/2DHG ordinarias (103) (estructuras de tipo HEMT normalmente activas o normalmente inactivas), que no son pseudoconductores (de acuerdo con la definición), las bandas a rayas grandes (102) muestran estructuras de 2DEG/2DHG pseudoconductoras (o estructuras de tipo PC-HEMT) (102), y el área (de segundo plano) de color blanco representa el sustrato de AlGaIn/GaN (101).

Por lo tanto, en un aspecto, el chip de sensor de RFID de SAW de la presente solicitud comprende:

un sustrato piezoeléctrico (101), comprendiendo dicho sustrato una capa piezoeléctrica y una estructura de heterounión multicapa, estando dicha estructura hecha de materiales semiconductores monocristalinos o policristalinos III-V, depositada sobre dicha capa piezoeléctrica y comprendiendo al menos una capa separadora y al menos una capa de barrera, estando dichas capas apiladas de forma alterna;

al menos un par de transductores interdigitados (IDT) de metal (100) montados sobre dicho sustrato piezoeléctrico (101), para recibir una señal de entrada de radiofrecuencia (RF), transducir dicha señal de entrada a una onda acústica de superficie (SAW), propagar dicha onda acústica de superficie a lo largo de una superficie de dicho sustrato piezoeléctrico (101) y transducir dicha onda acústica de superficie propagada a una señal de RF de salida;

al menos una estructura de tipo HEMT normalmente activa o normalmente inactiva (103) depositada sobre dicho sustrato piezoeléctrico (101) para formar un canal conductor de 2DEG o 2DHG normalmente activo o normalmente inactivo en dicha estructura de heterounión en la superficie de separación entre dicha capa separadora y dicha capa de barrera;

al menos una estructura de tipo PC-HEMT (102) depositada sobre dicho sustrato piezoeléctrico (101) para formar el canal de 2DEG o 2DHG pseudoconductor en dicha estructura de heterounión en la superficie de separación entre dicha capa separadora y dicha capa de barrera; y

metalizaciones eléctricas (no mostradas en la figura) acopladas capacitivamente a dichos IDT (100) y a dichas estructuras de tipo HEMT (103) y/o estructuras de tipo PC-HEMT (102) para inducir corrientes de desplazamiento, creando así unos contactos de fuente y de drenador no óhmicos, para conectar dicho chip de sensor a un circuito eléctrico.

Las estructuras de IDT de color negro (100) reciben la señal de RF de aproximadamente 0,5-2,5 GHz y exhiben el efecto piezoeléctrico creando ondas acústicas sobre la superficie del resonador. Estas ondas acústicas de superficie se propagan a lo largo del sustrato con interferencia constructiva a partir de los IDT tanto de entrada como de salida.

Las estructuras de 2DEG/2DHG ordinarias (103) se colocan y se someten a dibujo de patrones (se conectan) de tal modo que conectan eléctricamente, de forma directa, las cargas eléctricas positivas y negativas frente a desplazarse por la SAW y, por lo tanto, minimizan o cambian considerablemente la amplitud de la señal recibida en ambos IDT a través del efecto piezoeléctrico directo. Un electrodo de puerta de metal (104), que está conectado a un punto singular del cuerpo, se coloca de tal modo que exhibe el efecto de control por puerta sobre el canal conductor de 2DEG/2DHG de las estructuras de AlGaIn/GaN. Para aumentar el efecto de control por puerta, las áreas debajo de la puerta metálica se rebajan a estado pseudoconductor. Mediante el control por puerta de tal estructura de 2DEG/2DHG, la conexión eléctrica se interrumpe a través de las cargas negativas del cuerpo (principalmente negativas a través de la electrostática natural). Si se interrumpe la conexión eléctrica dentro de las estructuras de 2DEG/2DHG, entonces deja de estar presente el efecto parásito de conectar directamente las cargas de SAW, eso cambia el parámetro de transferencia S₂₁, que se mide como el cambio de amplitud en el dispositivo de antena de receptor (podría ser un chip de NFC de teléfono inteligente).

La **Figura 10** ilustra otra configuración de chip de sensor de SAW de 2DEG/2DHG topográfica básica. La interconexión se integra para suministrar al IDT (100) la potencia de radiofrecuencia. A la izquierda, la estructura de tipo PC-HEMT contiene una parte de 2DEG/2DHG pseudoconductor principal (102) junto con una parte de 2DEG/2DHG normal (no rebajada) (103) para mantener una estabilidad de S₂₁ de SAW mínima. Los contactos acoplados capacitivamente (105) están representados por las bandas de líneas cruzadas. En esta configuración, la sensibilidad máxima se logra con la influencia máxima sobre el parámetro de transferencia S₂₁ por la carga corporal de punto singular. Esto a su vez se logra a través del control por puerta adicional de la línea de alimentación de la antena de RF para el IDT por medio del mismo electrodo de puerta conectado al punto singular del cuerpo.

La **Figura 11** muestra otra configuración más del chip de sensor de SAW de 2DEG/2DHG de una realización de la presente solicitud. En esta configuración, las partes de la antena en serpentin para la señal y la carga a masa se separan al contraconectarse directamente entre sí a través de las líneas de 2DEG/2DHG parásitas (103) en la parte de arriba y en la parte de debajo del diseño mostrado. Estas líneas son controladas por puerta en las áreas de 2DEG/2DHG pseudoconductoras (102) por el electrodo de puerta (104) que, a su vez, está conectado a un punto singular del cuerpo (siempre negativo). Durante este control por puerta, las líneas de 2DEG/2DHG parásitas (103) se interrumpen posibilitando el aumento grande del parámetro de transferencia S₂₁. La dinámica de control por puerta representa directamente la dinámica de amplitud S₂₁ final y se refiere a la actividad pulmonar y cardiovascular hemodinámica medida en el punto singular del cuerpo.

La última configuración ilustrativa de una realización se muestra en la **Figura 12**. En esta configuración, la más simple, el área de 2DEG/2DHG pseudoconductor (102) está cubriendo toda el área de IDT de emisor-receptor y está opcionalmente conectada a través de los contactos no óhmicos (105) al electrodo de puerta (104) que, a su vez, está conectado a los IDT (100). La carga negativa de un cuerpo controlará por puerta (agotará) el área de 2DEG/2DHG pseudoconductor (102), que se ubica por debajo de las superficies de Schottky-metal, minimizando así el efecto de conexión directa parásita y aumentando enormemente la influencia sobre el parámetro de transferencia S₂₁.

En todas las configuraciones anteriores, el sustrato (101) comprende un material adecuado para formar la capa de barrera y está compuesto, por ejemplo, de zafiro, silicio, carburo de silicio, nitruro de galio o nitruro de aluminio. La estructura de heterounión de AlGaIn/GaN se deposita sobre esta capa de sustrato, por ejemplo, por un método de deposición en estado de vapor químico metalorgánico (MOCVD). Las estructuras de 2DEG/2DHG no rebajadas (103) se crean muy cerca de la superficie de separación entre la capa separadora de GaN y la capa de barrera de AlGaIn. El espesor específico de la capa de barrera de AlGaIn en el área de puerta abierta se logra o bien al grabar in situ el material semiconductor de la capa, es decir, rebajar la capa en el área de puerta abierta con la velocidad de grabado de 1 nm cada 1-2 minutos en un proceso controlable, o bien al recubrir la capa separadora de AlGaIn con una capa ultradelgada del material semiconductor de AlGaIn. Con el fin de aumentar la sensibilidad a la carga del sensor, la superficie de la capa de AlGaIn ultradelgada rebajada se trata posteriormente con un proceso de grabado epi con plasma (cloruro). En consecuencia, la superficie pasivada de forma nativa es activada por el grabado de plasma para crear enlaces o estados de energía de superficie no compensados (es decir, ionizados), que se neutralizan después del crecimiento de MOCVD.

La capa de barrera se puede o bien rebajar o bien hacer crecer como una capa delgada para obtener la estructura de 2DEG/2DHG rebajada (102). Por ejemplo, el canal de 2DEG formado en la superficie de separación entre la capa de GaN separadora y la capa de AlGaIn de barrera sirve como un elemento sensible principal del sensor que reacciona a una carga superficial y al potencial en el área de puerta abierta. El canal de 2DEG está configurado para interactuar con variaciones muy pequeñas en la carga superficial o proximal o cambios del campo eléctrico como resultado de que la SAW cree un efecto piezoeléctrico y, por lo tanto, interactúe con los estados de trampa de superficie de tipo donador de la capa de barrera de AlGaIn.

La **Figura 13** muestra esquemáticamente un artilugio o dispositivo ponible de la invención basándose en el chip de sensor de RFID de SAW de potencia cero para una lectura remota, que comprende los siguientes componentes:

- el chip de sensor de SAW (120) de la aplicación, insertado en un armazón (de artilugio) ponible y conectado a través de contactos (123) a un circuito eléctrico (122);

- una o dos antenas fractales de potencia cero de RFID de SAW de salida-entrada (130), cada uno conectado a dichos contactos (123) a través del circuito eléctrico (122) para recibir o transmitir una señal;
- una separación de salida-entrada por el transductor de SAW de línea de retardo (118);
- un circuito integrado (112) para almacenar y procesar dicha señal, y para modular y desmodular una señal de radiofrecuencia (RF), comprendiendo dicho circuito:
 - a) una fuente de voltaje (114) que suministra corriente eléctrica a dicho chip de sensor de SAW (120) y a dichas una o dos antenas (130);
 - b) un amplificador de corriente de CMOS o integrado (115) para la amplificación de una corriente eléctrica obtenida de dicho chip de sensor de SAW (120);
 - c) un convertidor de analógico a digital (ADC) con módulos de entrada/salida inalámbricos (116) conectados a dicho amplificador de corriente (115) para la salida inalámbrica de la señal convertida a una interfaz de usuario o memoria externa;
 - d) una unidad de microcontrolador (MCU) (113) para procesar y convertir la señal recibida en datos legibles en dicha interfaz de usuario o memoria externa; y
 - e) un módulo de conexión inalámbrica (117) para la conexión inalámbrica de dicho sensor a dicha interfaz de usuario o memoria externa.

La fuente de voltaje (114) puede ser cualquier batería adecuada y comercialmente disponible del tipo Li-ion o cualquier recolector de energía con convertidores de CA-CC o de CC-CC. La tarjeta de ADC (116) es cualquier tarjeta de registro de datos de convertidor de analógico a digital adecuada que se pueda comprar, por ejemplo, de National Instruments® o LabJack®. El amplificador de corriente (115) está conectado en línea y puede ser cualquier amplificador de femtoamperios comercialmente disponible, por ejemplo SR570 de SRS®, DLPVA-100-F-S, amplificador de corriente DDPKA-300 de FEMTO® o INA826EVM de Texas Instruments®. Opcionalmente, un amplificador de corriente puede funcionar directamente con corriente que fluye a través del canal de 2DEG de las estructuras de 2DEG al amplificador con una resistencia de entrada pequeña de 1 MΩ a una ganancia más alta que 10⁴ y solo 1 Ω a unas ganancias más bajas que 200. Esta configuración puede amplificar directamente la modulación de corriente eléctrica en el canal de 2DEG originado a partir de cargas corporales externas. Todos los componentes de lectura se alimentan con baterías para evitar una corriente parásita de circuito cerrado a masa.

En una realización específica, el módulo de conexión inalámbrica (117) puede ser uno de NFC o de Bluetooth de corto alcance que proporciona comunicación inalámbrica entre el artilugio o dispositivo ponible y un teléfono inteligente hasta 20 m. Si este módulo es de WiFi, la conexión se puede establecer con una red hasta 200 m, mientras que GSM permite la comunicación mundial a una nube de supervisión hemodinámica o una nube de telemedicina de diagnóstico médico. La memoria externa puede ser un dispositivo móvil (tal como un teléfono inteligente), ordenador de escritorio, servidor, almacenamiento remoto, almacenamiento en Internet, nube de supervisión hemodinámica o nube de telemedicina de diagnóstico médico.

En un aspecto adicional de la presente solicitud, el chip de sensor se puede insertar en un artilugio u objeto ponible, tal como una pulsera, un anillo, una banda para el cuello, un collar, un pendiente, un brazalete, una pulsera o un pendiente de clip, aplicado a cualquier punto de detección disponible en el cuerpo del usuario (brazos, antebrazos, muñecas, palmas, dedos, lóbulos de las orejas, tórax o cuello). En una realización particular, el sensor de la solicitud se puede usar para la supervisión hemodinámica desde cualquier punto singular en el cuerpo de un usuario y, específicamente, desde la muñeca.

Como se muestra en la presente solicitud, algunas realizaciones de los sensores de la presente solicitud se pueden usar en la supervisión hemodinámica, es decir, la detección, medición y supervisión de las señales cardíacas y la presión venosa central. Algunas realizaciones de los sensores de la presente solicitud también son capaces de registrar un fonocardiograma. Estas también son capaces de supervisar la respiración y diagnosticar la actividad pulmonar y, por lo tanto, se pueden usar en aplicaciones relacionadas con la actividad pulmonar y respiratoria.

En algunas realizaciones, el dispositivo ponible y el sistema de la presente solicitud se pueden usar para una solución de funcionamiento de larga duración portátil dentro de un diagnóstico de salud, de ejercicio físico y de telemedicina remota basado en la nube. Debido a que el dispositivo se usa en una supervisión hemodinámica, este debería tener un consumo de potencia muy pequeño que conserve la vida útil de la batería para un uso prolongado. En este caso, los contactos óhmicos del chip de sensor se pueden sustituir con contactos de alta resistividad no óhmicos que conectan capacitivamente el chip a un circuito eléctrico. Los contactos no óhmicos limitan en la práctica una corriente eléctrica que fluye a través del canal de 2DEG/2DHG al tener una resistencia eléctrica 3-4 veces más alta que la resistencia del canal de 2DEG/2DHG, reduciendo así el consumo de potencia eléctrica sin sacrificar sensibilidad y funcionalidad del sensor. Por lo tanto, El uso de contactos no óhmicos en algunas realizaciones del sensor de la presente solicitud es una solución de hardware que permite minimizar el consumo de potencia del dispositivo. En otra realización, el consumo de potencia del dispositivo se puede minimizar usando un algoritmo de software que gestiona

el tiempo de registro necesario del sensor y un modo de ahorro de batería, que limita los datos de segundo plano y conmuta la conexión inalámbrica solo cuando es necesario.

En un ejemplo, según es representado por la **Figura 14**, muestra esquemáticamente un sensor optoelectrónico de la invención para una lectura remota que comprende los siguientes componentes:

- 5 ■ el chip de sensor de SAW (120) de la aplicación conectado a un circuito eléctrico;
- una fuente de luz modulada (125), tal como un diodo emisor de luz de dispositivo montado en superficie (LED de SMD) o un diodo de láser UV-VIS-IR, para irradiar la superficie de capa de barrera de AlGaN de la estructura de 2DEG pseudoconductora (126) sobre el chip de sensor;
- 10 ■ conmutadores optoacopladores (124) para acoplar dicha fuente de luz modulada (125) con dicha estructura de 2DEG pseudoconductora (126) sobre el chip de sensor;
- una fuente de voltaje (104) conectada a dicho circuito eléctrico para suministrar corriente eléctrica a dicho chip de sensor de SAW (120);
- un amplificador de bloqueo (119) conectado a dicha fuente de voltaje (104) para la amplificación de una señal con una onda portadora conocida obtenida de dicho chip de sensor de SAW y aumentar la relación de señal a ruido; y
- 15 ■ un convertidor de analógico a digital (ADC) con tarjeta de entrada/salida digital incorporada (106) conectada a dicho amplificador de bloqueo (119) para emitir la señal convertida a una interfaz de usuario.

Como alternativa, el sensor de SAW se puede basar en un transductor de cristal electro-óptico (EOC) piezoeléctrico combinado con la estructura basada en 2DEG pseudoconductora para la supervisión hemodinámica. El dispositivo de SAW basándose en el sustrato piezoeléctrico de EOC exhibe el acoplamiento más alto entre energía eléctrica y mecánica en comparación con todas las otras variedades de sustratos. Adicionalmente, un sustrato de este tipo también tiene las ventajas de tener un coeficiente de cambio de velocidad alto y un coeficiente de acoplamiento electromecánico, K_2 , muy alto, lo que produce una sensibilidad de masa más grande en comparación con el mismo dispositivo de SAW ordinario en cualquier otro sustrato piezoeléctrico. El EOC puede ser cualquier material cristalino electro-óptico adecuado, tal como LiNbO_3 , que se pone en contacto físico con un punto singular en el cuerpo de un usuario. El EOC se ilumina entonces con una luz polarizada. En el caso del material cristalino de LiNbO_3 , la longitud de onda de la luz polarizada es de aproximadamente 400-600 nm. La luz modulada a partir de la fuente de luz ilumina el EOC, y cae entonces sobre la estructura basada en 2DEG/2DHG. La estructura basada en 2DEG/2DHG es extremadamente sensible a una luz incidente, creando pares de $p-n$ en la capa de barrera de AlGaN y, en consecuencia, afectando fuertemente a la conductividad de 2DEG/2DHG. En general, la irradiación de la estructura basada en 2DEG/2DHG con luz conmuta el canal de 2DEG/2DHG desde un estado normalmente inactivo a un estado pseudoconductor o normalmente activo. Por lo tanto, mediante un contacto con un cuerpo, el EOC es capaz de cambiar su absorbancia de luz afectando fuertemente al flujo de corriente eléctrica en el canal de 2DEG/2DHG, resolviendo así cualquier cambio de intensidad de luz, por pequeño que sea, proveniente del transductor de EOC.

Debido al hecho de que las señales hemodinámicas son relativamente lentas y tardan en registrarse, el sensor de SAW de una realización es capaz de rastrear toda la hemodinámica. Mediante el uso de la configuración basada en EOC, es posible desacoplar completamente la estructura de 2DEG/2DHG conductora de cualquier carga eléctrica parásita proveniente del cuerpo humano. Dependiendo de la longitud de onda de luz de excitación, se puede cambiar la posición del sensor con respecto al haz de luz incidente. Por ejemplo, en el caso de la luz IR (700-1500 nm), el sensor se debería colocar en perpendicular al haz de luz para lograr la sensibilidad más alta. La carga parásita del EOC se compensa a través de los electrodos unidos al cristal. Adicionalmente, se puede utilizar una diversidad de filtros de luz delante del sensor.

Por lo tanto, el uso de la configuración de EOC de SAW hace posible aumentar drásticamente la sensibilidad del sensor a una carga eléctrica, descargar el EOC a través del transporte de carga basado en SAW a lo largo de la superficie del cristal, modular eficientemente la luz polarizada a partir de la fuente de luz y controlar el efecto de línea de retardo de SAW con la señal de velocidad de fase. Los conmutadores optoacopladores (124) acoplan la estructura basada en 2DEG pseudoconductora (126) con el EOC de SAW de tal modo que las señales de accionamiento de SAW iniciales en los electrodos de IDT de emisor (izquierda) se sincronizan con la fuente de luz modulada (125) y con el V_{DS} en la estructura basada en 2DEG/2DHG pseudoconductora. Una señal en los electrodos de IDT de receptor (derecha) se acopla de nuevo al V_{DS} a través del optoacoplador (124), que se pone en resonancia con las señales iniciales y con la modulación de la fuente de luz (125). Debido a una conexión galvánica física del EOC de SAW con el punto singular del cuerpo mediante electrodos con dibujo de patrones espacial, el EOC cambia sus propiedades de absorción y modulación de la luz. Esto afecta fuertemente al modo resonante de las cinco fuentes de señal iniciales (V_{DS} , IDT de emisor, fuente de luz, IDT de receptor y fuente de luz modulada por SAW). Por lo tanto, debido a la interacción basada en la fuente de luz, el sistema resonante se vuelve muy estable y también muy sensible a las cargas externas.

De acuerdo con un ejemplo, un método para la supervisión hemodinámica de un usuario comprende las siguientes etapas:

- 1) Aplicar el dispositivo ponible de las realizaciones al cuerpo de un usuario;
- 2) Registrar señales recibidas del cuerpo del usuario en forma de una dinámica de parámetros de transferencia S21 del dispositivo a lo largo del tiempo (definida como dinámica de transferencia S21) con dicho dispositivo;
- 3) Transmitir las señales registradas desde dicho dispositivo a la memoria externa para su procesamiento adicional;
y
- 4) Convertir las señales transmitidas en señales digitales y procesar las señales digitales en la memoria externa, correlacionando dicha dinámica de transferencia S21 con formas de onda de electrocardiograma y de presión venosa central precalibradas almacenadas en la memoria externa, y extrayendo las señales cardíacas y la presión venosa central del usuario de dichas formas de onda en forma de datos médicos legibles, proporcionando así información médica hemodinámica.

La dinámica de transferencia S21 se puede correlacionar adicionalmente con formas de onda de fonocardiograma almacenadas en la memoria externa, proporcionando así información hemodinámica adicional acerca de la respiración y la actividad pulmonar relacionada con los sistemas pulmonar y respiratorio.

Referencias

- S. Nakayama, K. Sawamura, K. Mohri, T. Uchiyama, "Pulse-Driven Magnetoimpedance Sensor Detection of Cardiac Magnetic Activity", Plos One, Volumen 6, Número 10, e25834, 2011.
- J. An, H. Li, L. Miao, S. Qin, "A Study on Human Magnetocardiogram Using Giant Magneto-impedance Sensor", Second International Conference on Electronics, Communications and Control, 2012.
- Y. Kado, M. Shinagawa, "RedTacton Near-body Electric-field Communications Technology and Its Applications", NTT Technical Review, Vol. 8, n.º 3, marzo de 2010.
- 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 O₂-BCl₃ digital etching technique", Phys. Status Solidi C, vol. 7, n.º 7-8, págs. 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, and P. P. Chow, "Development of enhancement mode AlN/GaN high electron mobility transistors", Appl. Phys. Lett., vol. 94, n.º 26, pág. 263505, 2009.
- H. Chen, M. Wang, and K. J. Chen, "Self-aligned enhancement-mode AlGaIn/GaN HEMTs using 25 keV fluorine ion implantation", en la conferencia Device Research Conference (DRC), 2010, págs. 137-138.
- S. J. Pearton, B. S. Kang, Suku Kim, F. Ren, B. P. Gila, C. R. Abernathy, Jenshan Lin y S. N. G. Chu, "GaN-based diodes and transistors for chemical, gas, biological and pressure sensing", Journal of Physics: Condensed Matter, vol. 16 (2004), R961-R994.
- N. Shigekawa, K. Nishimura, H. Yokoyama y K. Hohkawa, "Surface Acoustic Waves in Reverse-Biased AlGaIn/GaN Heterostructures", IEEE Transactions-Electron Devices, vol. 55, n.º 7, julio de 2008, págs. 1585-1591.

REIVINDICACIONES

1. Un chip de sensor de identificación por radiofrecuencia (RFID) de onda acústica de superficie (SAW) que comprende:

5 (a) un sustrato piezoeléctrico (101), comprendiendo dicho sustrato una capa piezoeléctrica y una estructura de heterounión multicapa, estando dicha estructura hecha de capas semiconductoras monocristalinas o policristalinas III-V, depositada sobre dicha capa piezoeléctrica y comprendiendo al menos una capa separadora y al menos una capa de barrera, estando dichas capas apiladas de forma alterna;

10 (b) al menos un par de transductores interdigitados (IDT) de metal (100) montados sobre dicho sustrato piezoeléctrico (101), para recibir una señal de entrada de radiofrecuencia (RF), transducir dicha señal de entrada a una onda acústica de superficie (SAW), propagar dicha onda acústica de superficie a lo largo de una superficie de dicho sustrato piezoeléctrico (101) y transducir dicha onda acústica de superficie propagada a una señal de RF de salida;

15 (c) al menos una estructura de gas de electrones bidimensional (2DEG) o de gas de huecos bidimensional (2DHG) normalmente activa o normalmente inactiva (103) depositada sobre dicho sustrato piezoeléctrico (101) para formar un canal conductor de 2DEG o 2DHG normalmente activo o normalmente inactivo en dicha estructura de heterounión multicapa en la superficie de separación entre dicha capa separadora y dicha capa de barrera;

20 (d) al menos una estructura de gas de electrones bidimensional (2DEG) o de gas de huecos bidimensional (2DHG) pseudoconductor (102) depositada sobre dicho sustrato piezoeléctrico (101) para formar un canal de 2DEG o 2DHG pseudoconductor en dicha estructura de heterounión multicapa en la superficie de separación entre dicha capa separadora y dicha capa de barrera; y

(e) metalizaciones eléctricas acopladas capacitivamente a dichos IDT (100), a dichas estructuras de 2DEG o 2DHG normalmente activas o normalmente inactivas (103) y a dichas estructuras de 2DEG o 2DHG pseudoconductoras (102) para inducir corrientes de desplazamiento, creando así unos contactos de fuente y de drenador no óhmicos, para conectar dicho chip de sensor a un circuito eléctrico;

25 **caracterizado por que:**

(i) dichas capas semiconductoras mono o policristalinas III-V son de GaN/AlGaIn; y

30 (ii) dicha estructura de 2DEG o 2DHG pseudoconductor (102) es una estructura semiconductor formada sobre dicho sustrato piezoeléctrico (101) al rebajar o hacer crecer una capa de arriba de dicha estructura de heterounión multicapa hasta un espesor de 5-9 nm, siendo una rugosidad superficial de la capa de arriba rebajada o hecha crecer de 0,2 nm o menos, formando así el canal de 2DEG o 2DHG pseudoconductor capaz de conducir corriente eléctrica en el rango de corriente entre los modos de funcionamiento normalmente activo y normalmente inactivo del canal.

2. El chip de sensor de RFID de SAW de la reivindicación 1, en donde dicha capa piezoeléctrica está hecha de óxido de zinc, zafiro, nitruro de aluminio, tantalato de litio, niobato de litio, niobato de potasio, silicato de lantano y galio, sílice, carburo de silicio o cuarzo.

35 3. El chip de sensor de RFID de SAW de la reivindicación 1, en donde dicha estructura de heterounión multicapa contiene una capa separadora de GaN en la parte de debajo y una capa de barrera de AlGaIn en la parte de arriba, teniendo dicha capa de barrera de AlGaIn (i) un espesor de 5-9 nanómetros (nm), correspondiente al rango de corriente pseudoconductor entre el modo de funcionamiento normalmente activo y normalmente inactivo del canal de 2DEG formado, y (ii) una rugosidad superficial de 0,2 nm o menos.

40 4. El chip de sensor de RFID de SAW de la reivindicación 1, en donde dicha estructura de heterounión multicapa es de tipo emparedado, conteniendo una capa separadora de GaN en la parte de arriba, una capa separadora de GaN en la parte de debajo y una capa de barrera de AlGaIn entremedias, estando dicho canal conductor de 2DEG formado en la capa separadora de GaN de arriba por encima de la capa de barrera de AlGaIn, cerca de la superficie de separación entre dicha capa separadora de GaN de arriba y dicha capa de barrera de AlGaIn, dando así como resultado una polaridad de cara de N de dicha estructura, dicha capa separadora de GaN de arriba tiene (i) un espesor de 5-9 nanómetros (nm), correspondiente al rango de corriente pseudoconductor entre el modo de funcionamiento normalmente activo y normalmente inactivo del canal de 2DEG formado, y (ii) una rugosidad superficial de 0,2 nm o menos.

50 5. El chip de sensor de RFID de SAW de la reivindicación 1, en donde dicha estructura de heterounión multicapa es de tipo emparedado, conteniendo una capa separadora de GaN en la parte de arriba, una capa separadora de GaN en la parte de debajo y una capa de barrera de AlGaIn entremedias, estando dicho canal conductor de 2DHG formado en la capa separadora de GaN de arriba por encima de la capa de barrera de AlGaIn, cerca de la superficie de separación entre dicha capa separadora de GaN de arriba y dicha capa de barrera de AlGaIn, dando así como resultado una polaridad de cara de Ga de dicha estructura, dicha capa separadora de GaN de arriba tiene (i) un espesor de 5-9 nanómetros (nm), que corresponde al rango de corriente pseudoconductor entre el modo de

funcionamiento normalmente activo y normalmente inactivo del canal de 2DHG formado, y (ii) una rugosidad superficial de 0,2 nm o menos.

6. El chip de sensor de RFID de SAW de una cualquiera de las reivindicaciones 1-5, en donde el espesor de la capa de arriba es de 6-7 nm, preferiblemente 6,2-6,4 nm.

5 7. El chip de sensor de RFID de SAW de una cualquiera de las reivindicaciones 1-6, en donde dicha capa de arriba tiene una rugosidad superficial de aproximadamente 0,1 nm o menos, preferiblemente de aproximadamente 0,05 nm o menos.

10 8. El chip de sensor de RFID de SAW de una cualquiera de las reivindicaciones 1-7, que comprende adicionalmente una fuente de luz de excitación para irradiar dicho sustrato piezoeléctrico, induciendo así una corriente eléctrica en dicha estructura de 2DEG o 2DHG.

9. El chip de sensor de RFID de SAW de la reivindicación 8, en donde dicha fuente de luz de excitación es un diodo emisor de luz de dispositivo montado en superficie (LED de SMD) o diodo de láser UV-VIS-IR.

15 10. El chip de sensor de RFID de SAW de una cualquiera de las reivindicaciones 1-9, en donde dichos IDT de metal (100) son capaces de recibir la señal de RF de aproximadamente 0,5-2,5 GHz y de exhibir el efecto piezoeléctrico al crear ondas acústicas sobre la superficie de dicho sustrato piezoeléctrico.

11. Un dispositivo ponible con una lectura remota, que comprende:

■ el chip de sensor de RFID de SAW (120) de una cualquiera de las reivindicaciones 1-10, insertado en un armazón de dispositivo ponible y conectado a un circuito eléctrico (122);

20 ■ al menos una antena fractal de potencia cero de RFID de SAW de salida-entrada (130) conectada a dicho circuito eléctrico (122), para recibir o transmitir una señal;

■ una separación de salida-entrada por el transductor de SAW de línea de retardo (118);

■ un circuito integrado remoto (112) para almacenar y procesar dicha señal, y para modular y desmodular una señal de radiofrecuencia (RF), comprendiendo dicho circuito integrado remoto:

25 a) una fuente de voltaje (114) que suministra corriente eléctrica a dicho chip de sensor de RFID de SAW (120) y a dicha antena o antenas fractales de potencia cero de RFID de SAW de salida-entrada (130);

b) un amplificador de corriente de CMOS o integrado (115) para la amplificación de una corriente eléctrica obtenida de dicho chip de sensor de RFID de SAW (120);

30 c) un convertidor de analógico a digital con módulos de entrada/salida inalámbricos (116) conectados a dicho amplificador de corriente (115) para la salida inalámbrica de la señal convertida a una interfaz de usuario o memoria externa;

d) una unidad de microcontrolador (MCU) (113) para procesar y convertir la señal recibida en datos legibles en dicha interfaz de usuario o memoria externa; y

e) un módulo de conexión inalámbrica (117) para la conexión inalámbrica de dicho dispositivo ponible a dicha interfaz de usuario o memoria externa.

35 12. El dispositivo ponible de la reivindicación 11, en donde dicho módulo de conexión inalámbrica (117) es un módulo NFC o de Bluetooth® de corto alcance que proporciona comunicación inalámbrica entre dicho dispositivo de detección y la interfaz de usuario, dispositivo móvil u ordenador de escritorio; o un módulo de Wi-Fi que proporciona comunicación inalámbrica entre dicho dispositivo de detección y la interfaz de usuario, un dispositivo móvil, ordenador de escritorio o servidor; o un módulo de GSM que proporciona una comunicación inalámbrica mundial entre dicho dispositivo de detección y un servidor, almacenamiento remoto, almacenamiento en Internet, nube de supervisión hemodinámica o nube de telemedicina de diagnóstico médico.

40

13. El dispositivo ponible de la reivindicación 11, en donde dicho dispositivo ponible está en forma de una pulsera, un anillo, una banda para el cuello, un collar, un pendiente, un brazalete, una pulsera o un pendiente de clip.

14. Un método para la supervisión hemodinámica de un usuario que comprende:

45 1) Aplicar el dispositivo ponible de una cualquiera de las reivindicaciones 11-13 al cuerpo, brazo, antebrazo, muñeca, palma, dedo, lóbulo de la oreja, tórax o cuello del usuario;

2) Registrar señales recibidas del cuerpo del usuario en forma de una dinámica de parámetros de transferencia S21 del dispositivo a lo largo del tiempo con dicho dispositivo;

3) Transmitir las señales registradas desde dicho dispositivo a la memoria externa para su procesamiento adicional;

y

5 4) Convertir las señales transmitidas en señales digitales y procesar las señales digitales en la memoria externa, correlacionando dicha dinámica de transferencia S21 con formas de onda de electrocardiograma y de presión venosa central precalibradas almacenadas en la memoria externa, y extrayendo las señales cardíacas y la presión venosa central del usuario de dichas formas de onda en forma de datos médicos legibles, proporcionando así información médica hemodinámica.

10 15. El método de la reivindicación 14, en donde la dinámica de transferencia S21 se correlaciona adicionalmente con formas de onda de fonocardiograma almacenadas en la memoria externa, proporcionando así información hemodinámica adicional acerca de la respiración y la actividad pulmonar relacionada con los sistemas pulmonar y respiratorio.

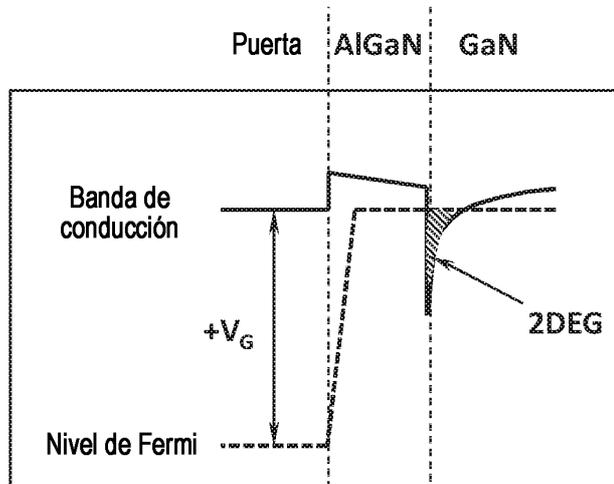


Fig. 1a

$V_G \gg V_T$

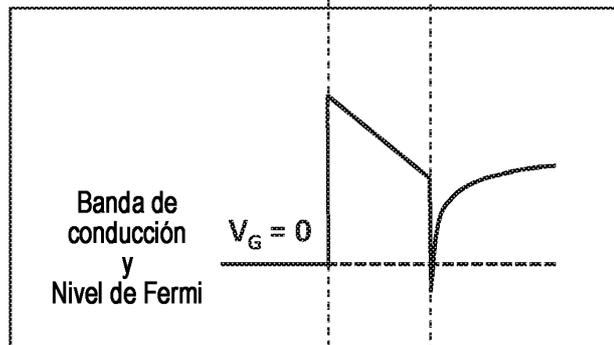


Fig. 1b

$V_G = 0$
 $V_G > V_T$

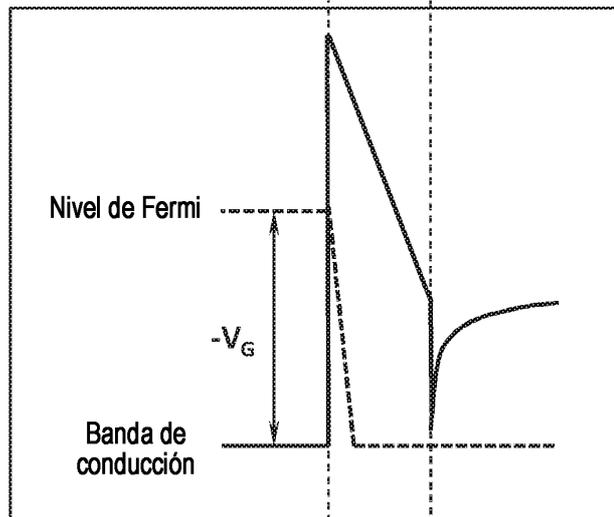


Fig. 1c

$V_G \ll V_T$

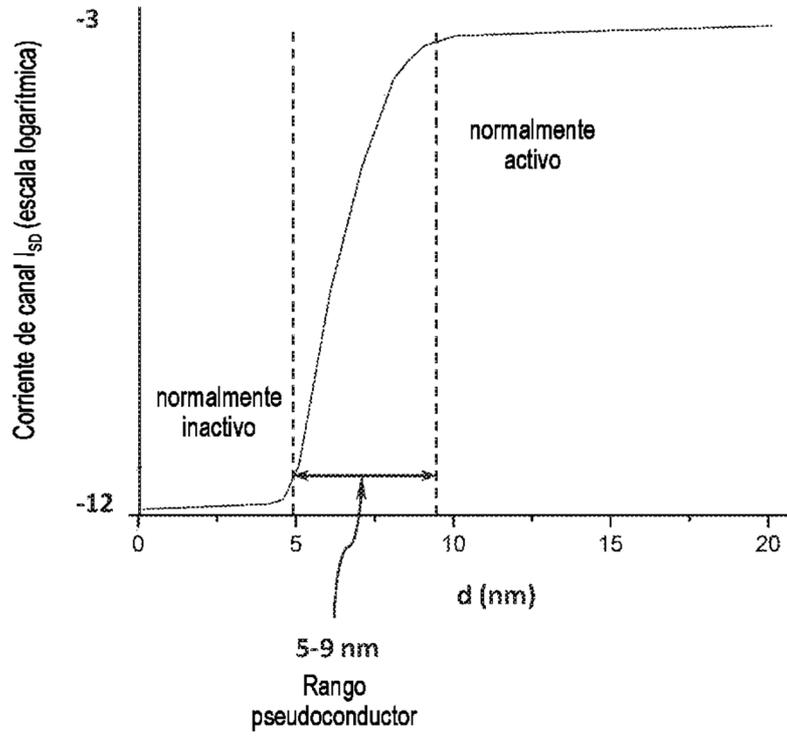


Fig. 2

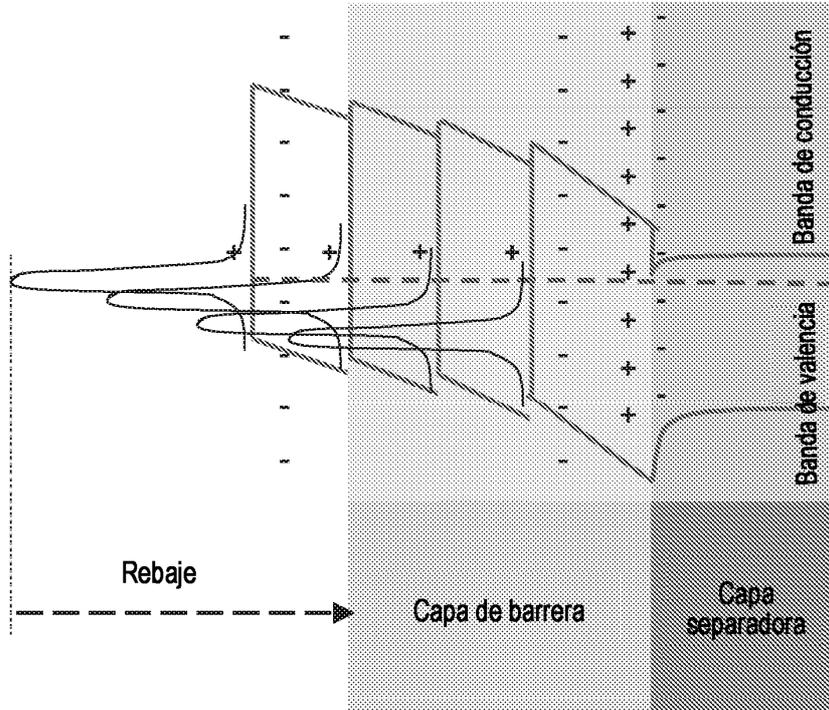


Fig. 3

AlGaIn hecho crecer ultradelgado

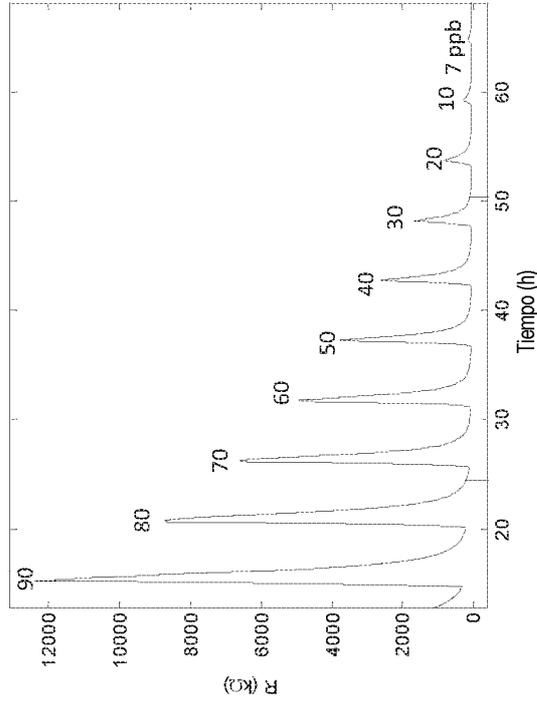


Fig. 4b

AlGaIn hecho crecer normalmente

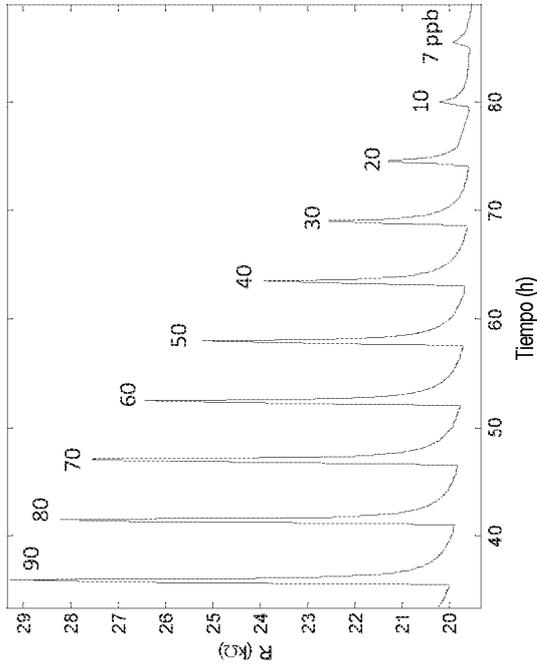


Fig. 4a

Fig. 5a

Polaridad de cara de Ga

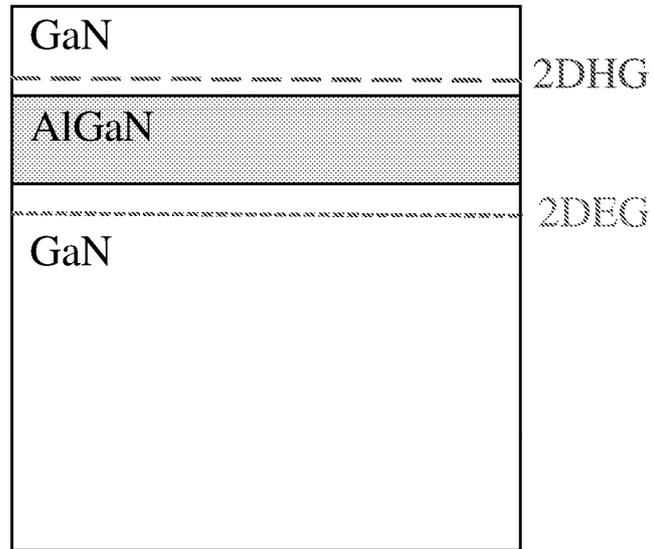
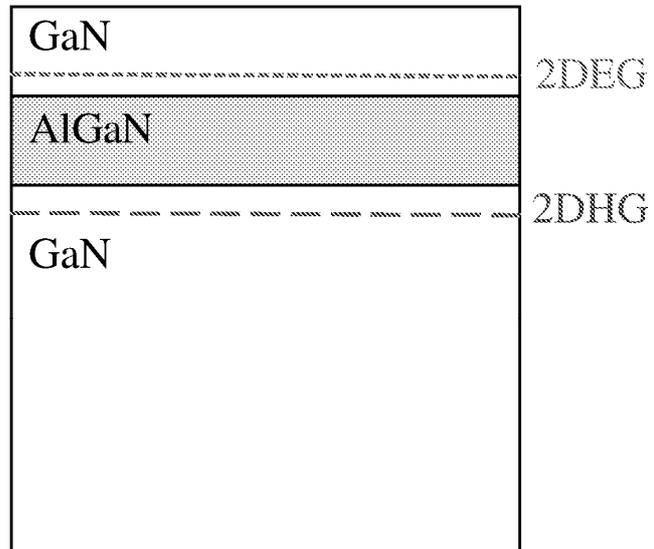


Fig. 5b

Polaridad de cara de N



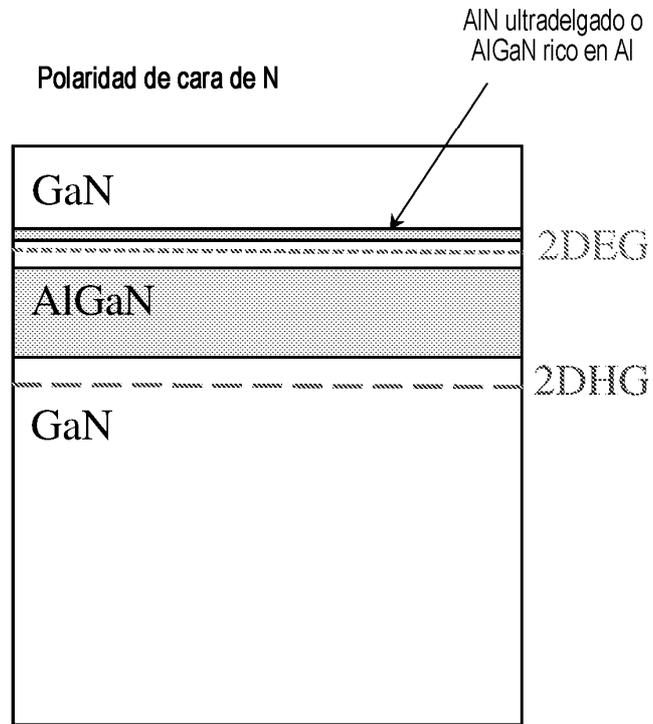


Fig. 6

Fig. 7b

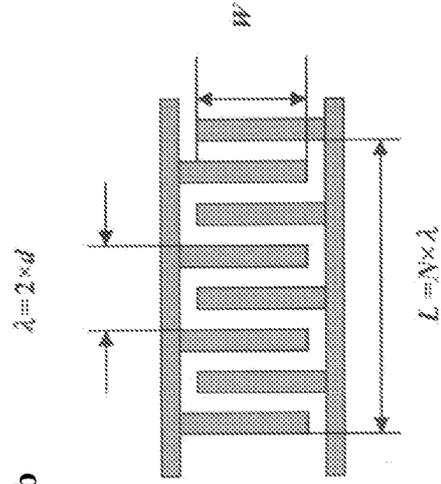


Fig. 7c

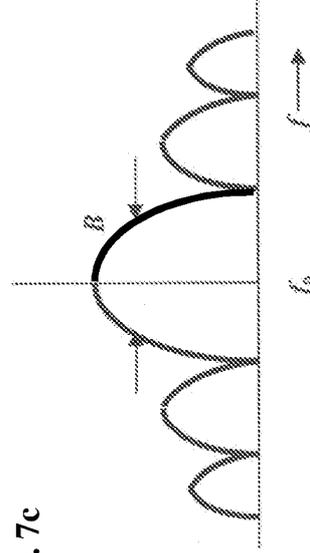
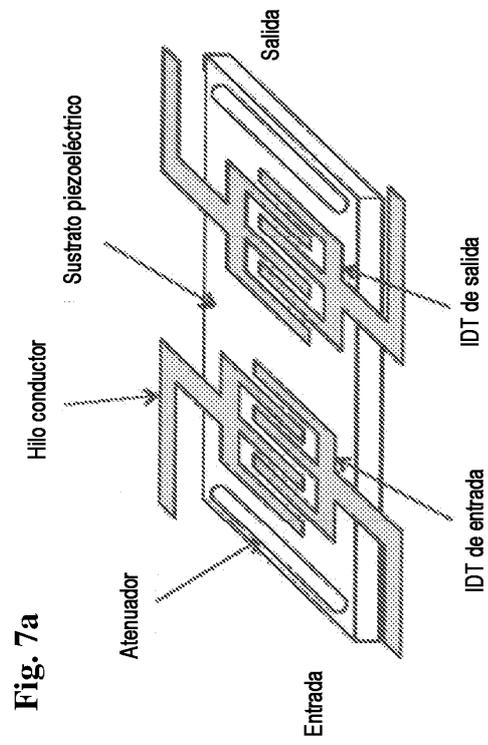


Fig. 7a



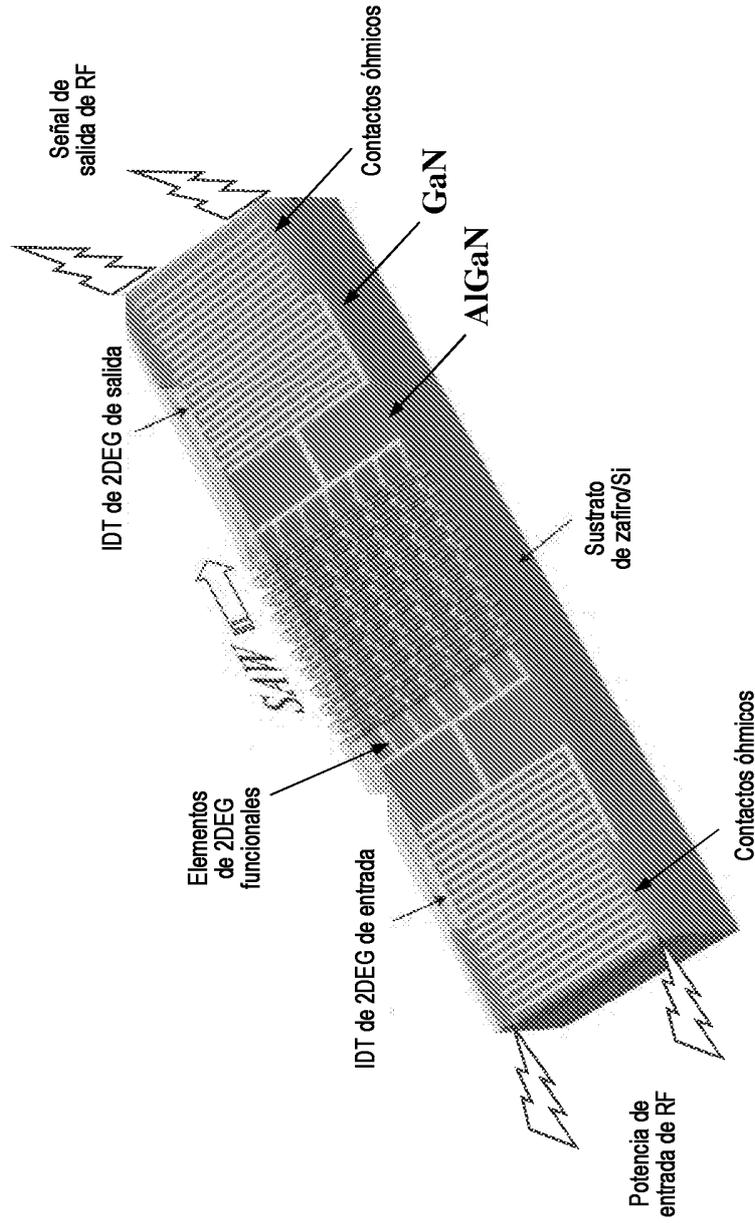


Fig. 8

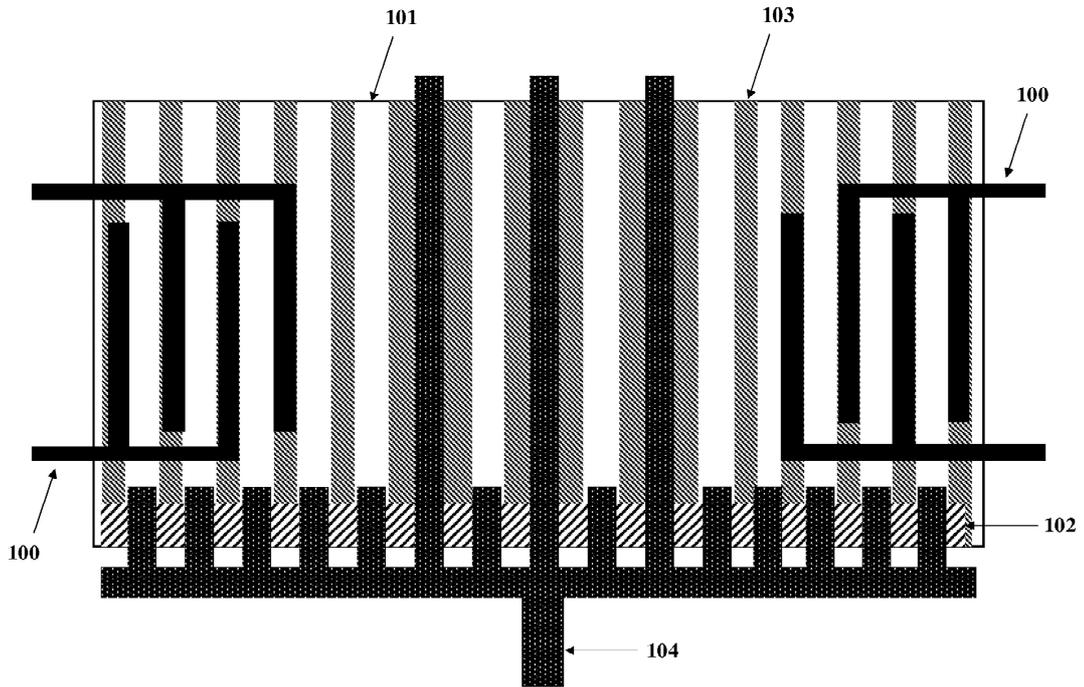


Fig. 9

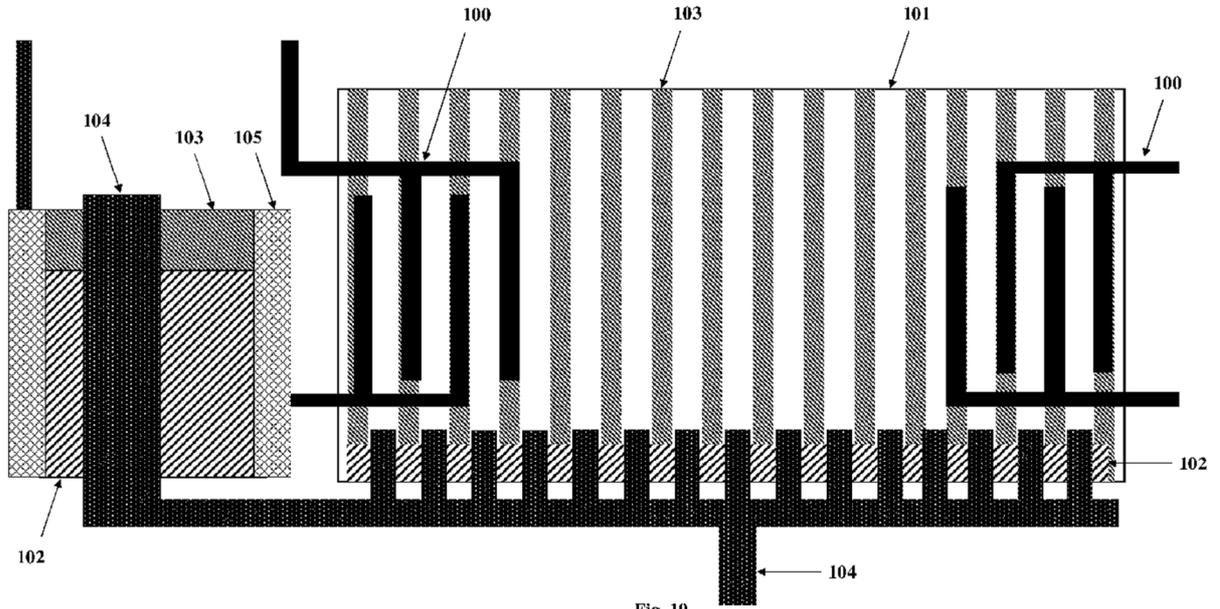


Fig. 10

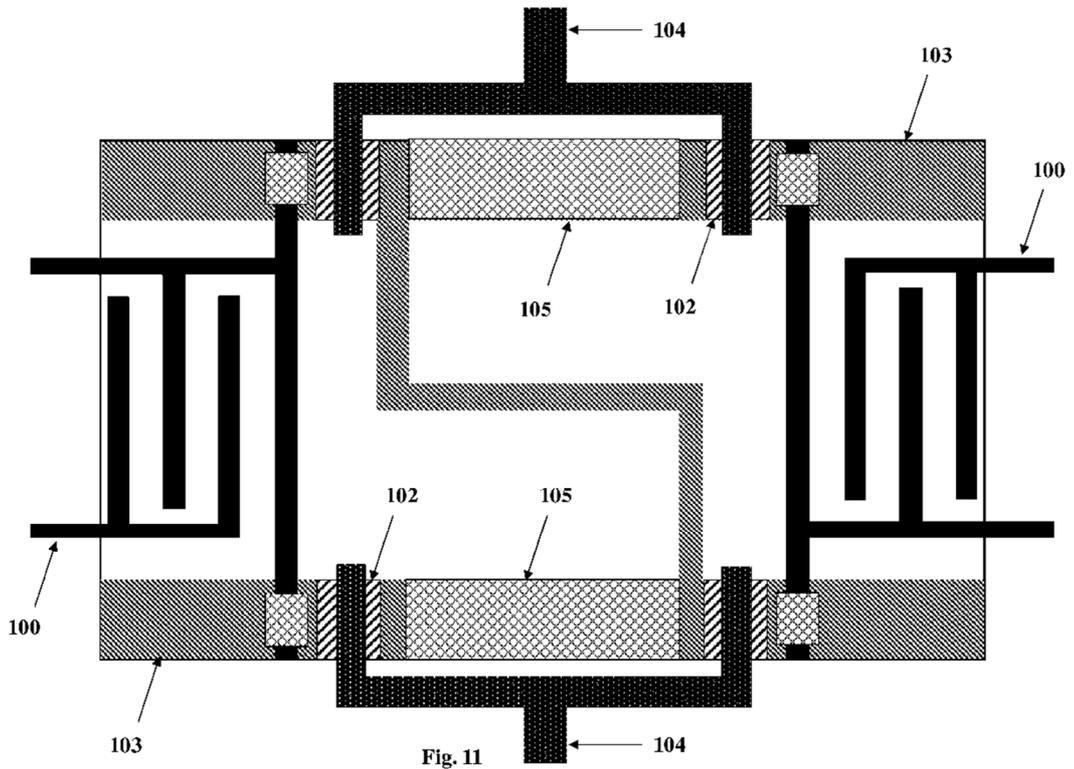


Fig. 11

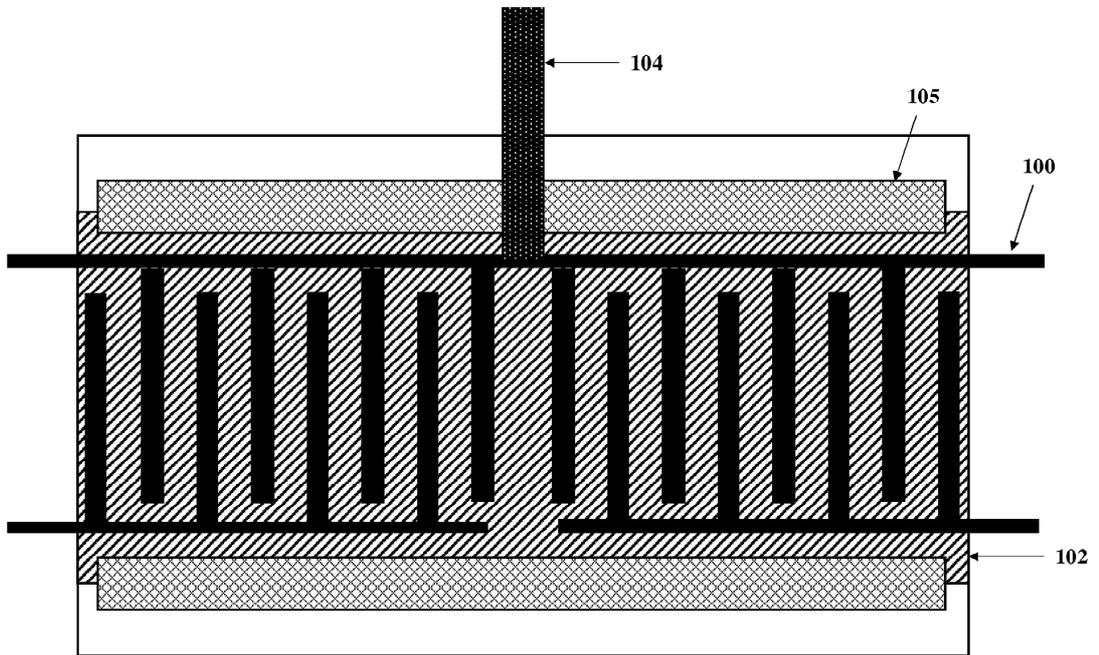


Fig. 12

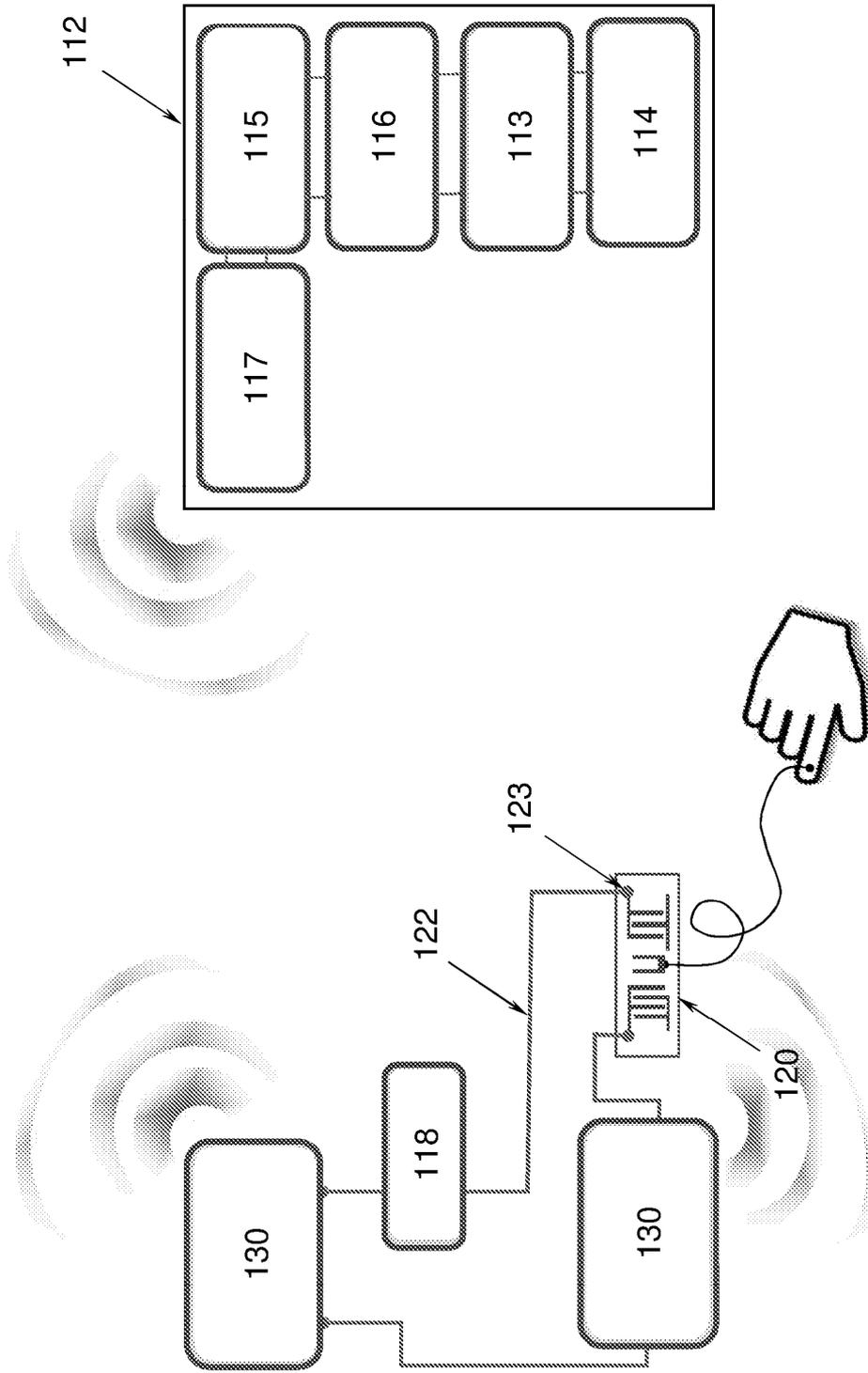


Fig. 13

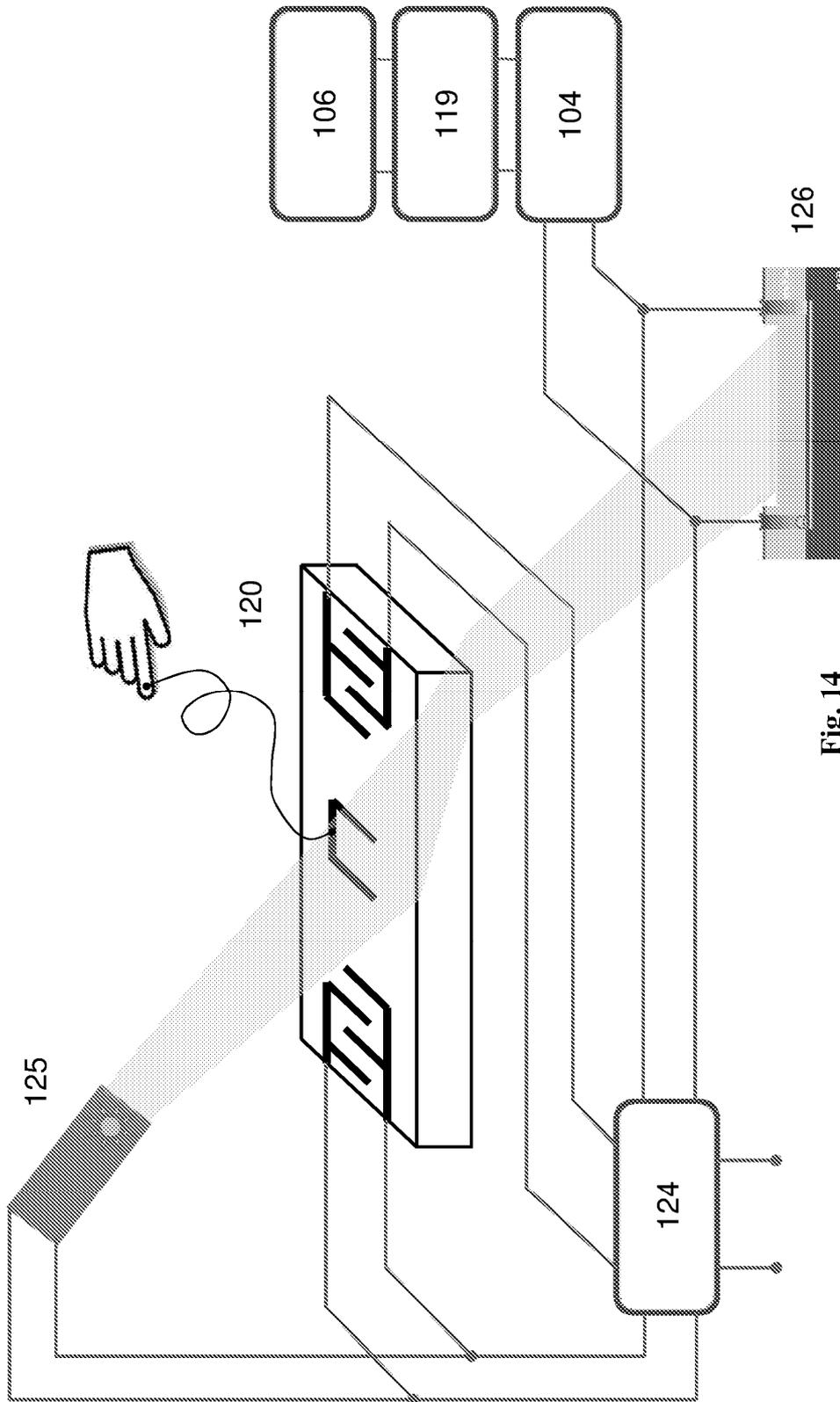


Fig. 14