

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 839 550**

51 Int. Cl.:

**H03H 9/64** (2006.01)

**G01N 27/414** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **10.07.2017 PCT/IB2017/054140**

87 Fecha y número de publicación internacional: **01.03.2018 WO18037296**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.07.2017 E 17745514 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.09.2020 EP 3501105**

54 Título: **Sensor de RFID de onda acústica de superficie para la detección de materiales y estructuras**

30 Prioridad:

**22.08.2016 US 201662377774 P**

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

**05.07.2021**

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 2 839 550 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 la detección de materiales y estructuras

**Campo técnico**

5 En general, la presente solicitud se refiere al campo de los sensores electrónicos basados en transductores de onda acústica de superficie (SAW). En particular, la presente solicitud se refiere al sensor de RFID de SAW de GaN/AlGaN y a su uso en la detección de materiales y estructuras.

**Antecedentes**

10 Los sensores de onda acústica de superficie (SAW) desempeñan un papel importante en muchos campos de detección de materiales y aplicaciones industriales. En general, una onda acústica de superficie es una onda acústica que se propaga a lo largo de la superficie de un cierto material (piezoelectrico). Esta se genera mediante electrodos de transductor interdigitado (IDT) (o "dedos"), que son barras metálicas periódicas especiales depositadas sobre un material piezoelectrico. Cuando se aplica cualquier onda sinusoidal que tiene un período igual al período de los electrodos de IDT, ocurre una vibración mecánica por debajo de los electrodos de IDT, generando así una onda acústica, que es perpendicular a la geometría de las barras de IDT. Esta onda acústica se propaga en la superficie del material piezoelectrico lejos de los electrodos de IDT en ambas direcciones.

15 La onda acústica generada por los IDT se localiza en la región de superficie y penetra en el material piezoelectrico a granel solo hasta una región de profundidad de longitud de onda. Esa es la razón por la cual la SAW tiene una densidad de energía muy alta en la superficie, que le da el nombre de "onda acústica de superficie". La SAW se propaga en un material piezoelectrico aproximadamente  $10^5$  veces más lentamente que una onda electromagnética ordinaria. En consecuencia, la longitud de onda de SAW en el material piezoelectrico es  $10^5$  veces más pequeña que la longitud de onda de una onda electromagnética, lo que hace que el sensor basado en SAW sea un dispositivo muy compacto.

20 La fabricación de los sensores de SAW requiere o bien la deposición o bien el grabado de los IDT metálicos en un material piezoelectrico, y esta usa la tecnología de proceso de CMOS, lo que permite una fabricación a gran escala. Los factores que pueden afectar a la condición de la superficie del material piezoelectrico incluyen la presión, la temperatura, la humedad y la carga másica. Por consiguiente, los sensores de SAW se pueden usar como sensores de presión, de temperatura y de humedad, y como sensores capaces de detectar cambios de masa o alteraciones de campo eléctrico en la superficie. Una tecnología de MEMS-CMOS facilita la integración de los sensores de SAW y sus circuitos de procesamiento de datos. También se pueden usar sensores de SAW especialmente diseñados en modo pasivo, sin necesidad de baterías. Se puede añadir una antena de RFID al electrodo de IDT de entrada y la señal recibida por la antena puede estimular entonces la SAW usada para la detección, como se ha mencionado anteriormente. En realidad, estos son los sensores de SAW que usan etiquetas de RFID. La sensibilidad extremadamente alta, la naturaleza compacta, la facilidad de fabricación y el funcionamiento inalámbrico hacen que estos sensores sean muy atractivos para la detección de materiales.

25 *Pearnton et al* (2004) en "*Topical Review: GaN-based diodes and transistors for chemical, gas, biological and pressure sensing*", *Journal of Physics: Condensed Matter* 16:29 (2004), páginas R961-R994, describe el uso de la heteroestructura de AlGaN/GaN para implementar el sensor de SAW y muestra que esta heteroestructura muestra una dependencia fuerte de la corriente de fuente/drenador en los canales de 2DEG inducidos por polarización piezoelectrica con las variaciones en las condiciones de frontera electrostática de la superficie libre por encima del canal. Sin embargo, la estructura conocida de esta publicación carece de una capa piezoelectrica adicional.

30 *Shigekawa et al* (2008) en "*Surface Acoustic Waves in Reverse-Biased AlGaN/GaN Heterostructures*", *IEEE Transactions on Electron Devices* 55:7 (2008), páginas 1585-1591, examina las propiedades de las SAW en heteroestructuras de AlGaN/GaN con polarización inversa hechas crecer sobre sustratos de zafiro (0001) al investigar las características de los filtros de SAW compuestos por unos IDT hechos de contactos óhmicos y Schottky interdigitales. Aunque esta publicación proporciona una estructura de heterounión multicapa sobre un sustrato de zafiro piezoelectrico, la misma no describe que la heteroestructura proporcionada sea una heteroestructura pseudoconductora (como se analizará posteriormente en el presente documento).

35 El documento CN 105 424 780 A, de Beijing Delft Electronic Technology Co., describe un sensor que comprende una heteroestructura que forma un canal de 2DEG, en donde el espesor de la capa de barrera se ajusta de manera flexible con el fin de mejorar el rango de detección del sensor. En particular, cuando se usa AlN, se notifica que el espesor de la capa de barrera está entre 2 y 8 nm. Sin embargo, esta publicación no está relacionada con la potenciación de la sensibilidad del sensor, que es el problema solucionado por la presente invención.

40 *Lalinsky, T. et al.* (2010) en "*Surface Acoustic Waves in Reverse-Biased AlGaN/GaN Heterostructures*", *IEEE Transactions On Electron Devices*, Centro de Servicios del IEEE, Pisacataway, N. J., EE. UU., vol. 55, n.º 7, 01 de julio de 2008 (1-07-2008), páginas 1585-1591, describe la provisión de una estructura de heterounión multicapa sobre un sustrato de zafiro piezoelectrico. Sin embargo, el documento no describe que la heteroestructura sea una heteroestructura pseudoconductora.

**Compendio**

La invención se define por las reivindicaciones independientes. La presente solicitud describe realizaciones de un sensor microelectrónico 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). En algunas realizaciones, el sensor contiene un sustrato piezoeléctrico, 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 montan transductores interdigitados (IDT), que transducen ondas acústicas de superficie, sobre el sustrato piezoeléctrico; estos se pueden instalar encima de la capa de barrera.

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 proporciona 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. Se puede depositar una capa dieléctrica opcional encima de la estructura de heterounión. El área de puerta abierta de la 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.

Los IDT se pueden hacer de materiales semiconductores de GaN/AlGaIn y de metal, convirtiendo los IDT en estructuras conductoras de 2DEG/2DHG. En una realización particular, el sustrato piezoeléctrico se puede colocar opcionalmente sobre una membrana independiente de GaN/AlGaIn, lo que da como resultado una configuración de SAW-FBAR (resonadores acústicos a granel de película), para lograr ultrasensibilidad. En otra realización, el sensor se puede basar en un sustrato piezoeléctrico de silicio ordinario firmemente conectado a un material estructural que se está sometiendo a prueba. En caso de cualquier esfuerzo o deformación mecánica de este material estructural, la pila de GaN/AlGaIn piezoeléctrica también se someterá a esfuerzo o se deformará, cambiando así los parámetros de propagación de SAW. Esto es debido al efecto de polarización piezoeléctrica dentro de las estructuras de SAW que da como resultado un cambio del parámetro de transferencia S21 en el receptor de IDT.

Los contactos no óhmicos (es decir, acoplados capacitivamente) de fuente y de drenador están conectados al canal de 2DEG/2DHG y a metalizaciones eléctricas, estas últimas se colocan encima del sensor y conectan este a un circuito eléctrico del sensor. Debido a que los contactos de fuente y de drenador son no óhmicos, la lectura de CC no se puede realizar. Con el fin de 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.

En algunas realizaciones, el sustrato de heterounión multicapa de la presente solicitud se puede hacer crecer a partir de cualquier material semiconductor monocristalino o policristalino III-V disponible, por ejemplo, GaN/AlGaIn, GaN/AlIn, GaN/InN, GaN/InAlIn, InN/InAlIn, GaN/InAlGaIn, GaAs/AlGaAs y LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub>. En un caso específico del sustrato hecho crecer a partir de GaN/AlGaIn, 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 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. Este espesor de capa rebajada corresponde al rango de corriente pseudoconductora 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/AlGaIn, y su uso en la detección de materiales y estructuras. En otra realización, 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:

5 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 ( $V_T$ ).

10 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/AlGaIn con el espesor de la capa de barrera de AlGaIn 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 4 muestra esquemáticamente la formación de los canales conductores de 2DEG y 2DHG en la estructura de PC-HEMT de AlGaIn/GaN de tres capas de cara de Ga.

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

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

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.

25 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.

Las Figuras 9a-9c muestran esquemáticamente una topología básica del sensor de una realización con membranas independientes, en donde las líneas (100) muestran las estructuras de IDT de metal, el área (102) muestra la estructura de tipo PC-HEMT y el área (103) muestra el sustrato estratificado con GaN/AlGaIn.

30 Las Figuras 10a-10b muestran esquemáticamente una topografía básica de la configuración de sensor de 2DEG-FBAR-SAW de una realización con una película de resonancia delgada (104) encima del sustrato.

La Figura 11 muestra las máscaras de diseño fotolitográfico del resonador de SAW basado en 2DEG usando la configuración convencional con dos estructuras de IDT (dedos) simétricas.

La Figura 12 muestra las imágenes SEM a partir de varios diseños de IDT diferentes de los resonadores de SAW fabricados a través de la técnica de dibujo de patrones de molienda por iones o de despegue.

35 La Figura 13 muestra las imágenes de microscopio de los resonadores de SAW fabricados de las Figuras 11-12 sobre las membranas de GaN/AlGaIn independientes que tienen el 2DEG no estructurado con el sustrato de Si retirado por DRIE.

La Figura 14 muestra esquemáticamente un método para la detección no destructiva del contenido de la tubería y la supervisión de la salud del material de tubería estructural con un micrófono ultrasensible de una realización.

40 La Figura 15a muestra una imagen de microscopio del micrófono ultrasensible de una realización.

La Figura 15b muestra esquemáticamente un sensor de una realización que comprende el chip de resonador de SAW y la antena en serpentín que genera la SAW en la superficie del chip.

La Figura 16 muestra las imágenes de microscopio de los resonadores de SAW como en la Figura 11, y también resalta la membrana de FBAR independiente en la configuración de FBAR-SAW del sensor.

45 La Figura 17 muestra esquemáticamente un sensor de RFID de SAW de potencia cero de una realización para la detección de materiales y estructuras con una lectura remota.

La Figura 18 muestra esquemáticamente un sensor optoelectrónico de una realización para la detección de materiales y estructuras con una lectura remota.

La Figura 19 muestra el parámetro de transferencia S21 experimental medido con el micrófono ultrasensible de una realización.

## 5 Descripción detallada

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.

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.

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 "en", "unido a", "conectado a", "acoplado con", "en contacto con", etc., otro elemento, este puede estar directamente en, unido a, conectado a, acoplado con, o en contacto con, el otro elemento, o también puede haber elementos intermedios presentes. 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 (AlGaN). 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 AlGaN, 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 AlGaN se graba y la puerta se acerca a la superficie de separación entre la capa de barrera de AlGaN 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 AlGaN/GaN, usar una barrera de AlGaN 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 AlGaN/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.

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. Como se ve a partir de la representación gráfica, las estructuras que tienen un espesor de la capa de barrera 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 constituyen dispositivos normalmente activos. Por otro lado, las estructuras que tienen un espesor de la capa de barrera inferior a aproximadamente 5 nm constituyen 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). El sensor contiene 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 invención se hace crecer a partir de GaN/AlGa<sub>N</sub>. En este caso del sustrato hecho crecer a partir de GaN/AlGa<sub>N</sub>, 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 AlGa<sub>N</sub>) 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.

El rango de corriente "de pseudocontacto" (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 cristal 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 AlGa<sub>N</sub> rebajada. El equilibrio de energía entre los estados de trampa de superficie de donador y la barrera de túnel de AlGa<sub>N</sub> conduce a la formación de 2DEG (neutralidad de carga combinada con el nivel de energía más bajo) en la discontinuidad de 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 AlGa<sub>N</sub> 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.

5 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.

10 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 AlGa<sub>N</sub> de arriba 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 AlGa<sub>N</sub> y una rugosidad fuertemente reducida de su superficie hacen que el sensor sea increíblemente sensible.

15 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.

20 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 piezoelectricas. 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.

35 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 AlGa<sub>N</sub>. 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 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 AlGa<sub>N</sub>/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 AlGa<sub>N</sub>/GaN que atrae electrones para formar 2DEG en la capa de GaN ligeramente debajo de esta superficie de separación.

40 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 AlGa<sub>N</sub>/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.

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 AlGa<sub>N</sub>. Esta es en realidad la misma configuración de dos capas que se ha descrito anteriormente, pero con la adición de la capa de GaN de arriba. En esta configuración, la capa de barrera de AlGa<sub>N</sub> 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 4, 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.

*Polaridad de cara de N*

5 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 5. 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.

10 4) La última configuración supone que el canal conductor de 2DHG se forma en la capa de GaN separadora debajo 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:

15 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

20 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).

25 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).

30 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.

35 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.

40 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.

45 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  
50 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  
55 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.

- 5 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 la 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.
- 10
- 15 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").
- 20 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 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.
- 25
- 30 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.
- 35
- El principio del sensor de SAW basado en transductor interdigitado (IDT) se muestra en las Figuras 7a-7c. Este se basa en dos IDT - uno para lanzar y el otro para detectar una onda que se desplaza de un extremo del sustrato piezoeléctrico al otro. 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 superficial y encapsulado final. Los sensores de SAW se fabrican a partir de materiales piezoeléctricos, habitualmente cuarzo. Cada IDT está compuesto por muchos pares de dedos definidos fotolitográficamente, en donde cada dedo tiene un ancho de solo unos pocos micrómetros.
- 40
- La SAW es extremadamente sensible a cambios de masa diminutos y es capaz de detectar una cantidad tan pequeña como 100 picogramos/cm<sup>2</sup> de un analito, lo que corresponde a la sensibilidad a menos de 0,01 monocapa de carbono. La velocidad y la atenuación de las ondas acústicas resultan de cambios en la masa de superficie en los dispositivos de SAW. Medir ambas de estas propiedades simultáneamente ayuda a determinar la naturaleza y la causa de la respuesta del sensor. En general, los sensores de SAW se diseñan al elegir la frecuencia y el ancho de banda de funcionamiento deseados.
- 45
- La SAW se puede expresar como un valor complejo  $\gamma = \alpha + i\beta$ , en donde la constante de atenuación  $\alpha$  y la constante de propagación  $\beta = 2\pi/\lambda$  dadas o calculadas son parámetros de diseño importantes del sensor de SAW ( $\lambda$  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 aplicada 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.
- 50
- 55 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
- 60

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.

Los sustratos basados en GaN/AlGaN 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/AlGaN 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/AlGaN ( $K_{ef}^2 = 0,001-0,002$ ), 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 de SAW basados en GaN/AlGaN que funcionan hasta el rango de 10 GHz se pueden diseñar e integrar con cualquier aplicación de detección remota inalámbrica.

Por lo tanto, el uso de la heteroestructura de GaN/AlGaN como sustrato piezoeléctrico para los sensores de SAW dará 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/AlGaN 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/AlGaN 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.

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.

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.

Los problemas anteriormente mencionados se pueden superar en la práctica mediante el uso de los dedos de IDT basándose en estructuras de tipo PC-HEMT al tiempo que también se aumenta la sensibilidad de sensor. En ese caso, Las características de 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 un contacto de Schottky. Además, los efectos de carga másica resultantes y el TTI se suprimen cuando se usan los transductores basados en 2DEG/2DHG en lugar de los 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 tales IDT de 2DEG/2DHG encima de una heteroestructura de GaN/AlGaN.

En general, cuando los IDT metálicos se colocan sobre un material semiconductor, 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 los dispositivos de SAW basados 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 funcionales basándose en el canal conductor de 2DEG/2DHG, tales como 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 muestra 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, las estructuras de heterounión de GaN/AlGaN se pueden usar como sensores de SAW en la membrana de GaN/AlGaN independiente. Es 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. 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. Por otro lado, los sensores basados en 2DEG/2DHG aumentan el 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.

La topología básica funcional del sensor de una realización se muestra esquemáticamente en las Figuras 9a y 9b. El objetivo de la topología de sensor de SAW de 2DEG/2DHG es lograr el efecto más grande posible del parámetro de transferencia  $S_{21}$  de transductor de SAW sin sacrificar la estabilidad de sensor. Las líneas (100) en las Figuras 9a y 9b se asignan a las estructuras de IDT de metal, banda (102) representa una estructura de tipo PC-HEMT, que es, en realidad, una estructura de 2DEG/2DHG rebajada al espesor de 5-9 nm para lograr el efecto pseudoconductor, y el área (103) muestra el sustrato piezoeléctrico GaN/AlGaN que crece opcionalmente sobre membranas independientes (101).

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

un sustrato piezoeléctrico (103) que crece opcionalmente sobre membranas independientes (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 (103), 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 (103) y transducir dicha onda acústica de superficie propagada a una señal de RF de salida;

al menos una estructura de tipo PC-HEMT (102) depositada sobre dicho sustrato piezoeléctrico (103) 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 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.

El uso de esta configuración con las membranas independientes hace posible aumentar la selectividad del sensor a través de la adición de esfuerzo mecánico (efecto de carga másica) como un parámetro adicional del sensor. Las membranas de tipo columnas de sustrato independientes muy flexibles (101) se pueden hacer del mismo material que la capa de sustrato piezoeléctrico (103) en todas las configuraciones del sensor. En una realización particular, se hacen crecer las membranas independientes (101), por ejemplo, a partir de zafiro, silicio, carburo de silicio, nitruro de galio o nitruro de aluminio, preferiblemente nitruro de galio (GaN), que tienen un espesor de 0,5-2  $\mu\text{m}$ . Como un ejemplo, las membranas de sustrato independientes muestran una sensibilidad alta a cualquier cambio de esfuerzo de tracción/compresión/mecánico en la superficie de la estructura de heterounión multicapa. Esto da como resultado un efecto de carga másica, que se analizará a continuación.

En general, los sensores mecánicos, de forma muy similar a los sensores de presión, se basan en la medición de la deformación inducida externamente en las heteroestructuras. Las propiedades piezoeléctricas de los nitruros del grupo III, tales como el nitruro de galio (GaN), permiten dos mecanismos para la transducción de deformaciones: piezoeléctrico y piezorresistivo. El efecto piezoeléctrico directo se usa para la detección de presión dinámica. Para las mediciones de presión estática, tales sensores no son adecuados debido a una cierta fuga de cargas eléctricas en las condiciones constantes. Para un funcionamiento estático, es más preferible la transducción piezorresistiva.

Se han empleado previamente sensores piezorresistivos que usan materiales de banda prohibida ancha usando materiales a granel de carburo de silicio hexagonales para un funcionamiento a temperatura alta. La piezorresistividad de las estructuras de GaN y de AlGaN es comparable a la del carburo de silicio. Sin embargo, la piezorresistividad se puede amplificar adicionalmente mediante cualquier estructura de HEMT, como es enseñado por Eickhoff *et al* (2001) en "*Piezoresistivity of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layers and Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN heterostructures*", *Journal of Applied Physics*, 2001, 90(7), 3383-3386. Para la detección de deformación piezorresistiva a presiones (o diferencias de presión) relativamente más bajas, se deberían usar diafragmas o membranas, en donde la presión externa se transfiere a una deformación interna cambiada causada por una flexión, como se muestra en la Figura 9c. El cambio resultante en la polarización altera la corriente de canal de 2DEG/2DHG que se mide.

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

de 2DEG.

La configuración de sensor que se muestra esquemáticamente en las Figuras 9a y 9b implica unas membranas de GaN independientes, sensibles a la carga y a la masa y acopladas piezoelectricamente, que se preparan, por ejemplo, de acuerdo con la patente de EE.UU. n.º 8.313.968, y ofrecen una solución elegante y eficaz para lograr tanto una reducción de escala como un accionamiento de detección de baja potencia totalmente eléctrico integrado. Como se ha mencionado anteriormente, GaN exhibe propiedades tanto piezoelectricas como piroelectricas, que se pueden combinar funcionalmente. Mientras que la piezoelectricidad posibilita la realización de un mecanismo de acoplamiento integrado, el 2DEG/2DHG ofrece además una sensibilidad pronunciada a la carga y al esfuerzo mecánico, lo que permite que el sensor use los efectos piroelectricos. El cambio dinámico en la conductividad de 2DEG/2DHG también es causado por un cambio en la polarización piezoelectrica.

Las Figuras 10a y 10b muestran otra configuración, que es muy similar a la configuración mostrada en las Figuras 9a-9b analizada anteriormente. Sin embargo, en el presente caso se introduce una película ultradelgada piezoelectrica resonante (104) encima del sustrato (103). Se genera una onda volumétrica que se propaga dentro de la película ultradelgada piezoelectrica (104) poniendo la misma entre dos electrodos y aplicando una señal de alta frecuencia. La onda resuena a una frecuencia particular de acuerdo con el espesor de la película ultradelgada. Tal resonador se denomina resonador acústico a granel de película (FBAR) y se combina en el sensor de una realización con la estructura de tipo PC-HEMT (102) para lograr una sensibilidad máxima. El FBAR usa tradicionalmente nitruro de aluminio (AlN) como su material piezoelectrico, sin embargo, otros nitruros del grupo III pueden ser una alternativa posible.

En general, las estructuras de los FBAR se hacen formando cavidades con una máquina de grabado en seco denominada "grabado con iones reactivos profundo" (RIE profundo) desde el reverso del sustrato o usando una capa de sacrificio, formando la capa de sacrificio debajo del electrodo inferior, una película delgada piezoelectrica y un electrodo superior, retirando entonces la capa para hacer un espacio por debajo del electrodo inferior.

Los electrodos de lado bajo y de lado superior que se muestran en la Figura 10b están diseñados con las así denominadas "ondas con fugas" que tienen unas velocidades de onda acústica de aproximadamente 4000 m/s. Las "ondas con fugas" se pueden definir como ondas que se propagan que concentran la mayor parte de la energía cerca de la superficie del sustrato, pero tienen algo de radiación de ondas volumétricas al sustrato mientras se propagan. El sustrato piezoelectrico usado para formar ondas con fugas se hace normalmente de un único cristal de LiTaO<sub>3</sub> que tiene unos ejes X, Y y Z y un plano de corte. El eje X del cristal está orientado en una dirección de la propagación de SAW, mientras que el plano de corte del cristal está rotado alrededor del eje X con un cierto ángulo de rotación con respecto al eje Y hacia el eje Z. Este ángulo varía normalmente entre 40° y 42°. Esa es la razón por la cual el sustrato se denomina comercialmente "LiTaO<sub>3</sub> Y-X de 42°". Los IDT (100) se forman sobre el sustrato y se alinean en una fila en la dirección de propagación de SAW, como se muestra en la Figura 10a.

Cada IDT tiene un par de dedos de electrodo primario opuestos entre sí (mostrados como líneas (100) en las Figuras 10 y 11) y dedos de electrodo secundario (mostrados en la Figura 9) e incluye al menos un transductor frontal, un transductor medio y un transductor posterior, que están alineados en la fila en la dirección de propagación de SAW, como se muestra en la Figura 10a.

La Figura 11 muestra las máscaras de diseño fotolitográfico del resonador de SAW basado en 2DEG usando la configuración convencional con dos estructuras de IDT (dedos) simétricas. Los dedos de IDT están hechos preferiblemente de aleaciones metálicas de Cr10/60Au y tienen un ancho preferible de 200, 300, 400, 500 o 700 nm. Estos se fabrican en una etapa de haz de electrones como una pila de sistema de resistencia bicapa de despegue o una resistencia negativa y molienda por iones. El 2DEG/2DHG no está estructurado en ese caso e interacciona con el medio circundante. El área (601) en el medio representa los dedos de IDT primarios en un área independiente, en donde el sustrato (de silicón) se retirará mediante el proceso de grabado con iones reactivos profundo (DRIE), como se ha mencionado anteriormente.

La Figura 12 muestra las imágenes SEM del resonador de SAW de una realización como se muestra en las Figuras 9-11. Este resonador de SAW se fabrica a través de la técnica de dibujo de patrones de molienda por iones o de despegue. La Figura 13 muestra las imágenes de microscopio de estos resonadores de SAW en las membranas de GaN/AlGaIn independientes que tienen el área de 2DEG/2DHG no estructurada con el sustrato de silicio retirado por medio del proceso de DRIE. Los IDT de SAW mostrados en el presente caso tienen diferentes periodos de IDT que varían desde 200 nm a 700 nm y, por lo tanto, reflejan la luz de manera diferente. En general, las ondas con fugas se usan frecuentemente en estos tipos de sustratos por su coeficiente de acoplamiento electromecánico relativamente grande, lo que posibilita que estos formen una banda de paso relativamente ancha requerida para transmitir y recibir señales de dispositivos móviles. Por ejemplo, en el presente resonador de SAW que tiene una frecuencia de trabajo de 2 GHz, la longitud de onda  $\lambda$  se calcula a partir de  $\lambda \times 2 \times 10^9 = 4000 \text{ m/s}$ , dando como resultado  $\lambda = 2 \text{ }\mu\text{m}$ . Esta longitud de onda calculada debería ser igual a una longitud que es el doble del paso de electrodos para la excitación, y suponiendo que los espacios entre los electrodos son los mismos que el ancho de electrodo, se estima que el ancho del electrodo es de 0,5  $\mu\text{m}$ . Los espacios reales entre los electrodos son de aproximadamente 0,7  $\mu\text{m}$  como se ve en la Figura 12.

Por lo tanto, las estructuras de IDT (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. Como se muestra en las Figuras 9-10, La estructura de tipo PC-HEMT (102) se coloca en la trayectoria de propagación bidireccional de SAW y también se somete a dibujo de patrones de tal modo que conecta eléctricamente, de forma directa, las cargas eléctricas positivas y negativas frente a desplazarse por la SAW y, por lo tanto, minimiza o cambia considerablemente la amplitud de la señal recibida en ambos IDT a través del efecto piezoeléctrico directo. La propia SAW es generada por una antena en serpentín de potencia cero (no mostrada en el presente caso) conectada a ambos IDT (100).

En la configuración de sensor anterior de una realización, mostrada en las Figuras 9-10, el sustrato piezoeléctrico (103) 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 hecha de GaN/AlGaN se deposita sobre esta capa de sustrato piezoeléctrico, por ejemplo, por un método de deposición en estado de vapor químico metalorgánico (MOCVD). La estructura de tipo PC-HEMT (102) se crea muy cerca de la superficie de separación entre la capa separadora de GaN y la capa de barrera de AlGaN. El espesor específico de 5-9 nm de la capa de barrera de AlGaN se logra o bien al grabar en seco 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 AlGaN con una capa ultradelgada del material semiconductor de AlGaN. Con el fin de aumentar la sensibilidad a la carga del sensor, la superficie de la capa de AlGaN ultradelgada rebajada se trata posteriormente con el 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 el canal de 2DEG/2DHG pseudoconductor, que se forma en la superficie de separación entre la capa de GaN separadora y la capa de AlGaN de barrera, como se ha descrito anteriormente en detalle. La estructura de GaN/AlGaN rebajada es, en realidad, una estructura de tipo PC-HEMT (debido a su espesor específico) que da como resultado una corriente pseudoconductor en el canal de 2DEG/2DHG. Como se ha explicado anteriormente, este canal formado en la superficie de separación entre la capa de GaN separadora y la capa de AlGaN de barrera sirve como un elemento sensible principal del sensor que reacciona a una carga superficial y al potencial. El canal de 2DEG/2DHG formado está configurado para interactuar con variaciones muy pequeñas en la carga superficial o proximal o cambios del campo eléctrico como resultado de que las ondas acústicas de superficie que se están propagando creen un efecto piezoeléctrico y, por lo tanto, interaccionen con los estados de trampa de superficie de tipo donador de la capa de barrera de AlGaN.

La Figura 14 muestra esquemáticamente un método para la detección no destructiva del contenido de la tubería (por ejemplo, petróleo, gas o arena) y la supervisión de la salud del material de tubería estructural con un micrófono ultrasensible (200) o una red de micrófonos de una realización. El micrófono (200) es, en realidad, un sensor 2DEG-FBAR-SAW (agrandado en el diseño) de la realización. El método comprende las siguientes etapas:

- 1) Colocar el accionador de emisor de ultrasonidos (201) directamente sobre la tubería;
- 2) Colocar los micrófonos (200) o bien en un círculo alrededor del accionador de emisor de ultrasonidos (201) o bien desplazados lateralmente a lo largo de la tubería (como en la Figura 14); y
- 3) Detección o supervisión del frente de onda de ultrasonidos reflejado (202) o bien con un único micrófono (200) o bien con la red de micrófonos (como en la Figura 14).

La red de micrófonos crea una configuración de red de fase pasiva que permite una detección considerablemente más precisa y selectiva del contenido químico en la tubería. Una imagen de microscopio del micrófono ultrasensible de la presente solicitud construido por los inventores de la presente invención se muestra en la Figura 15a. En realidad, esta es un chip de resonador de SAW, como se ha descrito anteriormente, que incorpora la estructura de tipo PC-HEMT para aumentar la sensibilidad del sensor. La SAW propiamente dicha es generada por una antena en serpentín de potencia cero que se muestra en la Figura 15b. El sensor con la antena en serpentín tiene unas dimensiones de 5-30 mm (largo) x 1-5 mm (ancho), mientras que el chip de resonador de SAW es de aproximadamente 2 mm<sup>2</sup>. El chip de resonador de SAW tiene un contacto mecánico directo con un material a someter a detección, tal como una pared exterior de la tubería. La detección y supervisión del contenido de la tubería, que habitualmente es agua, petróleo, arena o gas, se basa en la reflexión del frente de onda de ultrasonidos desde la pared de metal o el contenido de la tubería en la superficie de separación entre la pared y el contenido.

La amplitud de la señal de ultrasonidos reflejada es muy baja debido a un acoplamiento de ondas de ultrasonidos inicial muy alto, y se pierden múltiples reflexiones de onda de ultrasonidos secundarias. En general, la amplitud, la forma, la fase y el desplazamiento por efecto Doppler del frente de onda de ultrasonidos reflejado en la superficie de separación entre la pared de la tubería y el contenido de la tubería depende principalmente de la densidad, la presión, la composición y la velocidad del flujo de contenido dentro de la tubería. Un único micrófono de la presente solicitud es extremadamente sensible a la energía de onda de ultrasonidos que interacciona con una heterounión de

GaN/AlGaIn altamente piroeléctrica. La sensibilidad más alta del micrófono se puede alcanzar solo a las frecuencias resonantes de este micrófono. Cuanto más alta sea la frecuencia de resonancia, el límite de detección será más bajo y la sensibilidad será más alta. Con el fin de lograr las frecuencias resonantes, los inventores de la presente invención propusieron usar la FBAR-SAW híbrida en las membranas de GaN/AlGaIn independientes que transducen las ondas SAW, como se ha descrito anteriormente, y que tienen la primera frecuencia resonante armónica con una amplitud alta en comparación con estructuras no independientes. Estos nuevos prototipos de resonadores de FBAR-SAW de la Figura 13 diseñados y construidos por los inventores de la presente invención se muestran en la Figura 16 junto con el dibujo esquemático del resonador de FBAR-SAW basándose en las membranas independientes colocadas en contacto con la tubería sometida a detección.

5 Cada micrófono ultrasensible (200) mostrado en la Figura 14 puede estar codificado por RFID, tener una capacidad de NFC de potencia cero y estar equipado además con una estructura de antena de receptor-emisor bidireccional. También es posible acoplar todos los micrófonos a una única antena en serpentín y separar las señales con patrón RFID mixtas mediante códigos de frecuencia ortogonal (OFC) a partir de micrófonos individuales mediante un algoritmo, que se describirá en otra parte. Esto permitirá construir una red de sensores de SAW de potencia cero sin baterías ni conexiones de cables, reduciendo así drásticamente el coste del sensor. Cada micrófono de SAW se puede controlar además por fase y puede detectar el cambio de fase más pequeño de la SAW. Al operar los sensores en una configuración de red en fase, será posible medir, por ejemplo, el caudal, la laminaridad de líquidos y las fracciones de gas.

10 La Figura 17 muestra esquemáticamente un micrófono ultrasensible de una realización, para la detección de materiales y estructuras, con una lectura remota, que comprende los siguientes componentes:

- 15
  - el chip de sensor de SAW (120) de la aplicación conectado a través de unos 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;
- 20
  - 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);
    - 30 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;
    - 35 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.

40 La fuente de voltaje (114) puede ser cualquier batería adecuada y comercialmente disponible del tipo de ion de Li, cualquier recolector de energía con convertidores de CA-CC o de CC-CC o un elemento fotovoltaico. 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 DDPVA-300 de FEMTO® o INA826EVM de Texas Instruments®.

45 Opcionalmente, un amplificador de corriente puede funcionar directamente con corriente que fluye a través del canal de 2DEG/2DHG de las estructuras de 2DEG/2DHG al amplificador con una resistencia de entrada pequeña de 1 MΩ a una ganancia más alta que  $10^4$  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/2DHG 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.

50 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 Wi-Fi, la conexión se puede establecer con una red hasta 200 m, mientras que GSM permite la comunicación mundial a una nube. La memoria externa puede ser un dispositivo móvil (tal como un teléfono inteligente), ordenador de escritorio, servidor, almacenamiento remoto, almacenamiento de Internet o nube

de diagnóstico de materiales.

Como se muestra en la presente solicitud, los sensores de las realizaciones se usan como micrófonos portátiles ultrasensibles para la detección de materiales y estructuras. El sensor portátil de una realización debería tener un consumo de potencia muy pequeño que conserve la vida útil de la batería para un uso prolongado. En este caso, son preferibles los contactos de alta resistividad no óhmicos que conectan capacitivamente el sensor a un circuito eléctrico. De hecho, los contactos no óhmicos son capaces de limitar una corriente eléctrica que fluye a través del canal conductor de 2DEG/2DHG al tener una resistencia eléctrica 3-4 veces más alta que la resistencia eléctrica 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 el sensor de las realizaciones 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.

Como se ha descrito anteriormente, el sensor de la presente solicitud se puede realizar en dos configuraciones: con y sin membranas independientes. En la primera configuración, el sustrato piezoeléctrico se coloca opcionalmente sobre una membrana independiente de GaN/AlGaIn, lo que da como resultado una configuración de FBAR-SAW, para lograr ultrasensibilidad. En otra configuración, el sensor se basa en un sustrato piezoeléctrico de silicio ordinario firmemente conectado a un material estructural, tal como una tubería de metal, que se está sometiendo a prueba. En caso de cualquier esfuerzo o deformación mecánica de este material estructural, la pila de GaN/AlGaIn piezoeléctrica también se someterá a esfuerzo o se deformará, cambiando así los parámetros de propagación de SAW. Esto es debido al efecto de polarización piezoeléctrica dentro de las estructuras de SAW que da como resultado un cambio del parámetro de transferencia S21 en el receptor de IDT.

Como alternativa, el sensor de una realización, se puede basar en un transductor de cristal electroóptico (EOC) piezoeléctrico combinado con la estructura de tipo PC-HEMT (estructura basada en 2DEG/2DHG rebajada). El sensor 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  $\text{LiNbO}_3$ , 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  $\text{LiNbO}_3$ , 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 ultrasensible a una luz incidente, creando pares de  $p-n$  en la capa de barrera de AlGaIn, afectando así fuertemente a la conductividad de canal 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. 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.

En otra realización más, la Figura 18 muestra esquemáticamente un dispositivo de detección optoelectrónico de una realización, para la detección de materiales y estructuras, con una lectura remota que comprende los siguientes componentes:

- 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 AlGaIn de la estructura de 2DEG/2DHG pseudoconductora (126) sobre el chip de sensor;
- conmutadores optoacopladores (124) para acoplar dicha fuente de luz modulada (125) con dicha estructura de 2DEG/2DHG 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
- 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 o memoria externa.

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/2DHG (126) con el EOC de SAW de tal modo que las señales de accionamiento de SAW iniciales en los electrodos de emisor (izquierda) de IDT se sincronizan con la fuente de luz modulada (125) y con el  $V_{DS}$  en la estructura basada en 2DEG/2DHG pseudoconductor. Una señal en los electrodos de receptor (derecha) de IDT 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.

La Figura 19 muestra el parámetro de transferencia  $S_{21}$  experimental medido con el micrófono ultrasensible de las realizaciones. En algunas realizaciones, un método para la detección de materiales y estructuras comprende las siguientes etapas:

- 1) Aplicar el dispositivo de detección de las realizaciones a un material o estructura a someter a detección;
- 2) Registrar señales recibidas del material o la estructura en forma de una dinámica de parámetros de transferencia  $S_{21}$  del dispositivo a lo largo del tiempo (definida como dinámica de transferencia  $S_{21}$ ) 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, correlacionar dicha dinámica de transferencia  $S_{21}$  con formas de onda de material o estructura precalibradas almacenadas en la memoria externa, y extraer la información de material o estructura de dichas formas de onda en forma de datos legibles.

## 25 Referencias

- S. D. Burnham, K. Boutros, P. Hashimoto, C. Butler, D. W. S. Wong, M. Hu y M. Micovic, "Gate-recessed normally-off GaN-on-Si HEMT using a new  $O_2$ - $BCl_3$  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.
- M. Eickhoff, O. Ambacher, "Piezoresistivity of  $Al_xGa_{1-x}N$  layers and  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  heterostructures", *Journal of Applied Physics* 90, 3383 (2001).

**REIVINDICACIONES**

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

(a) un sustrato piezoeléctrico (103), comprendiendo dicho sustrato:

5 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 (103), 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 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) pseudoconductora (102) depositada sobre dicho sustrato piezoeléctrico (103) para formar un 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

(d) metalizaciones eléctricas acopladas capacitivamente a dichos IDT (100) 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;

20 *caracterizado por que:*

(i) dichos materiales semiconductores monocristalinos o policristalinos III-V son de GaN/AlGaIn; y

25 (ii) dicha estructura de 2DEG o 2DHG pseudoconductora (102) es una estructura semiconductor formada sobre dicho sustrato piezoeléctrico (103) 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:

30 (A) 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 pseudoconductora 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; o

35 (B) 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 pseudoconductora 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; o

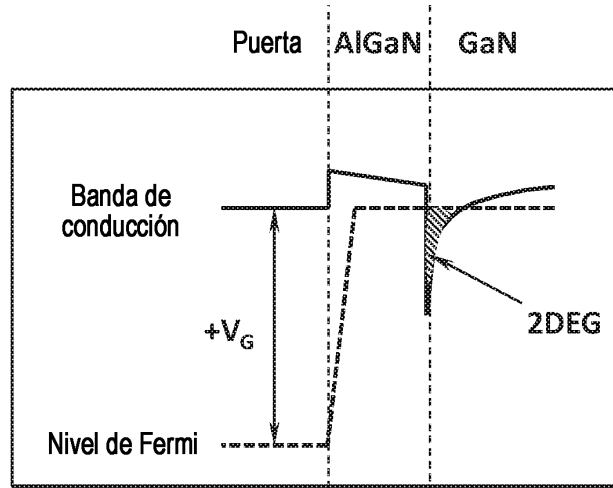
40 (C) dicha estructura de heterounión multicapa es de tipo emparedado, conteniendo una capa separadora de GaN en la parte de arriba, una capa separadora de GaN en la parte de debajo y una capa de barrera de AlGaIn entremedias, estando dicho canal conductor de 2DHG formado en la capa separadora de GaN 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 pseudoconductora 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.

3. El chip de sensor de RFID de SAW de la reivindicación 1 o 2, en donde el espesor de la capa de arriba de dicha estructura de heterounión multicapa es de 6-7 nm, preferiblemente 6,2-6,4 nm.

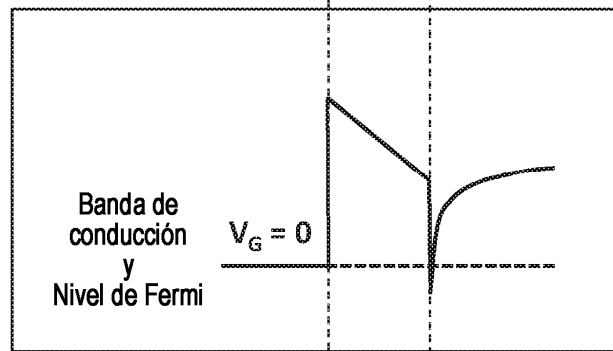
50 4. El chip de sensor de RFID de SAW de una cualquiera de las reivindicaciones 1-3, en donde dicha capa de arriba de dicha estructura de heterounión multicapa tiene una rugosidad superficial de aproximadamente 0,1 nm o menos, preferiblemente de aproximadamente 0,05 nm o menos.

5. El chip de sensor de RFID de SAW de la reivindicación 1, en donde dicho sustrato piezoeléctrico se coloca sobre una membrana independiente (101).
6. El chip de sensor de RFID de SAW de la reivindicación 5, en donde dicha membrana independiente (101) está hecha de zafiro, silicio, carburo de silicio, nitruro de galio o nitruro de aluminio.
- 5 7. 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, silicio, carburo de silicio o cuarzo.
8. El chip de sensor de RFID de SAW de una cualquiera de las reivindicaciones 1-7, 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  
10 crear ondas acústicas sobre la superficie de dicho sustrato piezoeléctrico (103).
9. El chip de sensor de RFID de SAW de una cualquiera de las reivindicaciones 1-8, que comprende adicionalmente una fuente de luz de excitación para irradiar dicho sustrato piezoeléctrico, induciendo así una corriente eléctrica en dicho canal de 2DEG o 2DHG.
10. El chip de sensor de RFID de SAW de la reivindicación 9, 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 11. Un dispositivo de detección con una lectura remota, para la detección de materiales y estructuras, que comprende:  
el chip de sensor de RFID de SAW de una cualquiera de las reivindicaciones 1-8, insertado en un armazón de dispositivo de detección y conectado a un circuito eléctrico (122);  
al menos una antena fractal de RFID de SAW de salida-entrada (130) conectada a dicho circuito eléctrico (122), para  
20 recibir o transmitir una señal;  
una separación de salida-entrada por el transductor de SAW de línea de retardo (118); y  
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:  
a) una fuente de voltaje (114) que suministra corriente eléctrica a dicho chip de sensor de RFID de SAW y a dicha  
25 antena o antenas fractales 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;  
c) un convertidor de analógico a digital con módulos de entrada/salida inalámbricos (116) conectados a dicho  
30 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 de detección a dicha interfaz de usuario o memoria externa.
- 35 12. Un dispositivo de detección con una lectura remota, para la detección de materiales y estructuras, que comprende:  
el chip de sensor de RFID de SAW de las reivindicaciones 9 o 10, insertado en un armazón de dispositivo de detección y conectado a un circuito eléctrico;  
una fuente de luz modulada (125) para irradiar la superficie de las estructuras de 2DEG o 2DHG pseudoconductoras (126) de dicho chip de sensor de RFID de SAW;  
40 conmutadores optoacopladores (124) para acoplar dicha fuente de luz modulada (125) con dichas estructuras de 2DEG o de 2DHG pseudoconductoras (126) del chip de sensor de RFID de SAW;  
una fuente de voltaje (104) conectada a dicho circuito eléctrico para suministrar corriente eléctrica a dicho chip de sensor de RFID de SAW;  
45 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 RFID de SAW y para aumentar la relación de señal a ruido; y  
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 o memoria externa.

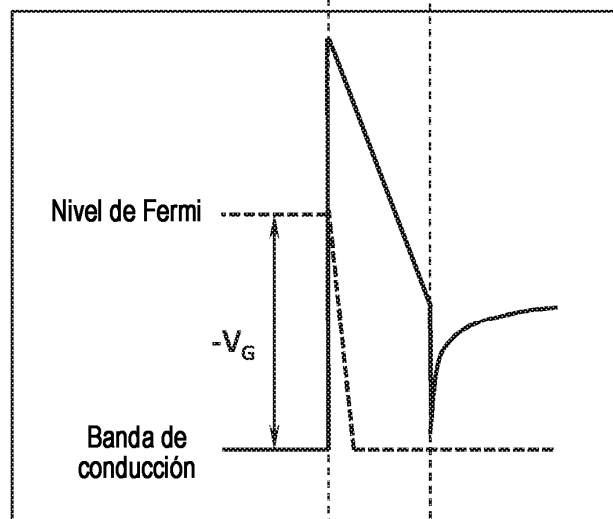
- 5 13. El dispositivo de detección de la reivindicación 11 o 12, en donde (i) dicha memoria externa es un dispositivo móvil, ordenador de escritorio, servidor, almacenamiento remoto, almacenamiento de Internet o nube de diagnóstico de materiales; o (ii) dicha fuente de voltaje (104) es una batería del tipo ion de litio o cualquier recolector de energía con convertidores de CA-CC o de CC-CC; o (iii) 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 de Internet o nube de diagnóstico de materiales.
- 10 14. El dispositivo de detección de una cualquiera de las reivindicaciones 11-13, en donde dicho dispositivo es un micrófono ultrasensible.
15. Un método para la detección de materiales y estructuras que comprende:
- 1) Aplicar el dispositivo de detección de una cualquiera de las reivindicaciones 11 a 14 a un material o estructura a someter a detección;
- 15 2) Registrar señales recibidas del material o la estructura 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
- 20 4) Convertir las señales transmitidas en señales digitales, procesar las señales digitales en la memoria externa, correlacionar dicha dinámica de transferencia S21 con formas de onda de material o estructura precalibradas almacenadas en la memoria externa, y extraer la información de material o estructura de dichas formas de onda en forma de datos legibles.



**Fig. 1a**  
 $V_G \gg V_T$



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



**Fig. 1c**  
 $V_G \ll V_T$

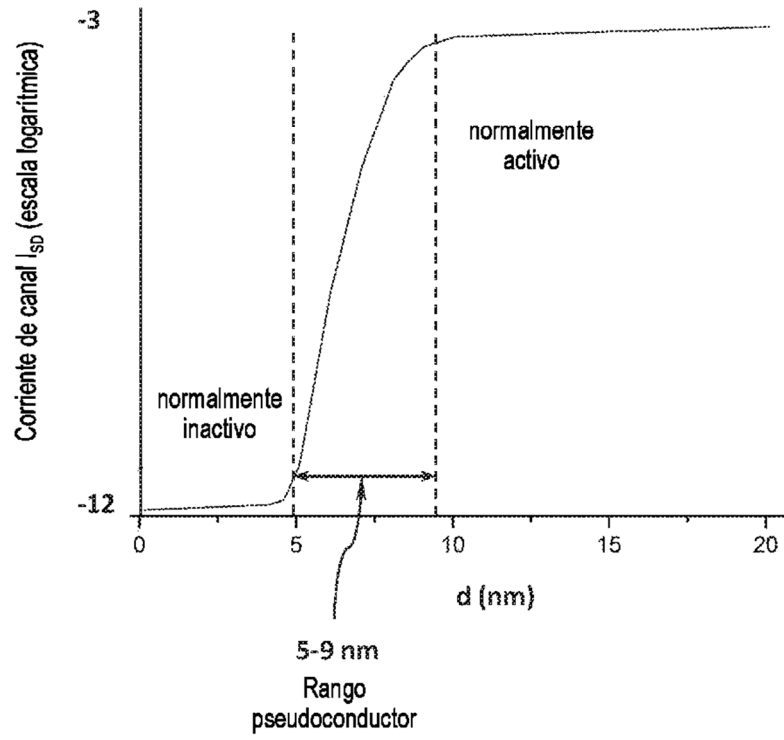


Fig. 2

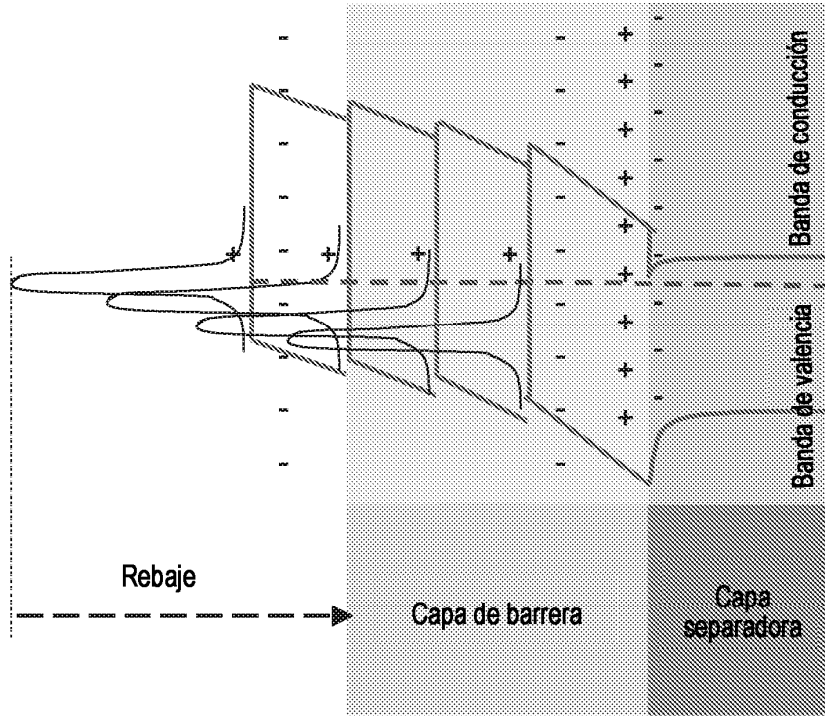


Fig. 3

AlGaIn hecho crecer ultradelgado

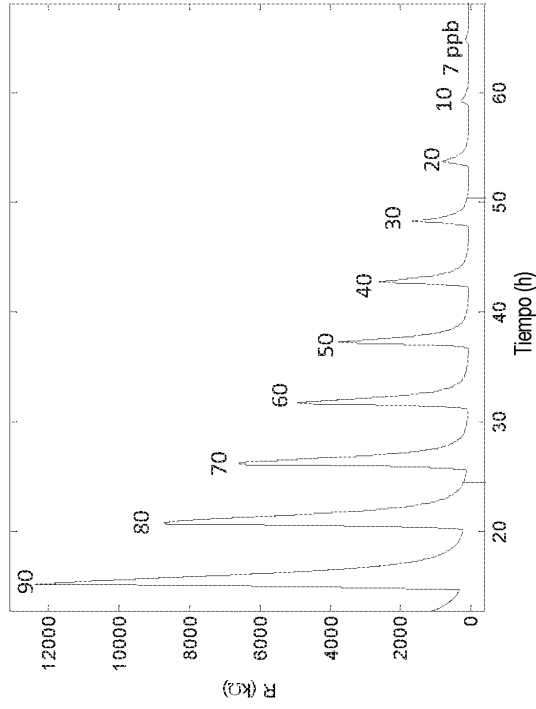


Fig. 4b

AlGaIn hecho crecer normalmente

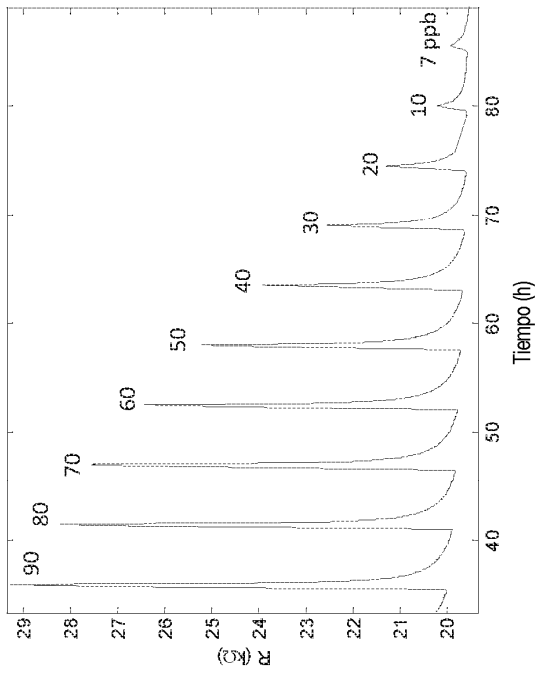
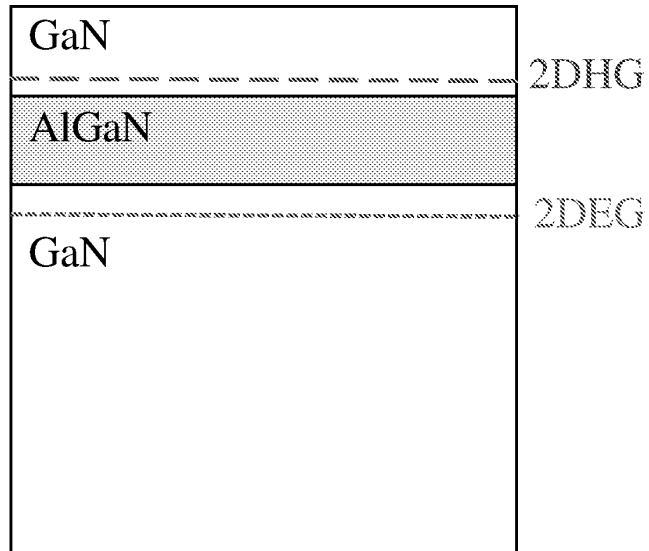


Fig. 4a

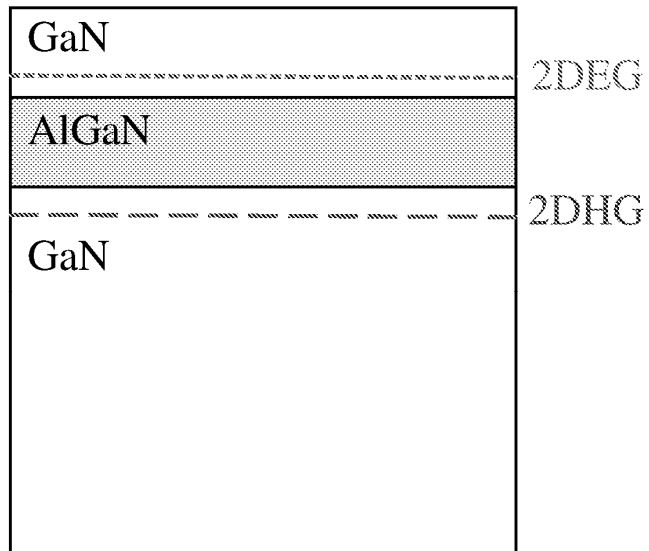
**Fig. 5a**

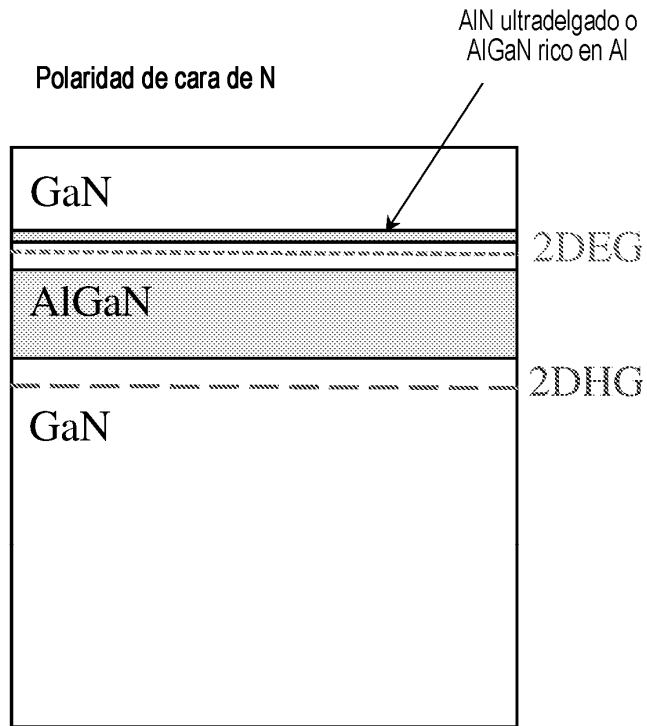
Polaridad de cara de Ga



**Fig. 5b**

Polaridad de cara de N





**Fig. 6**

Fig. 7b

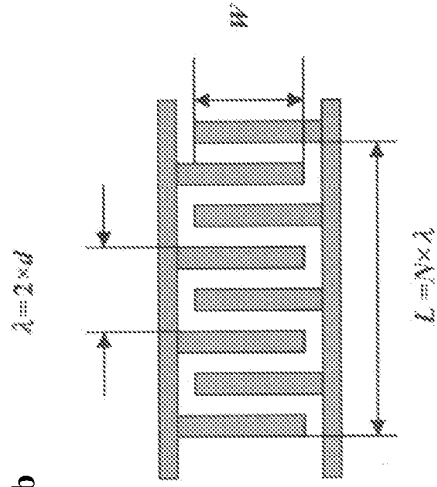


Fig. 7c

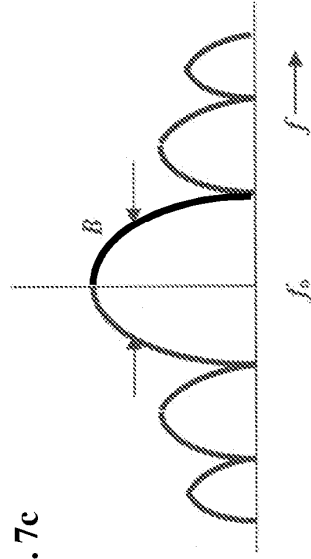
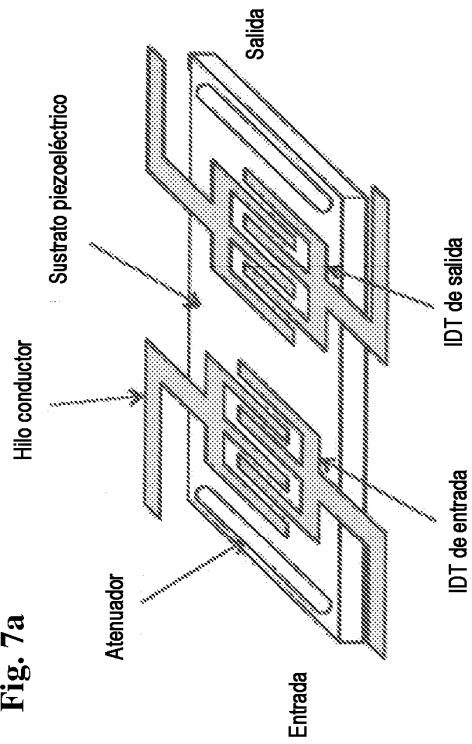


Fig. 7a



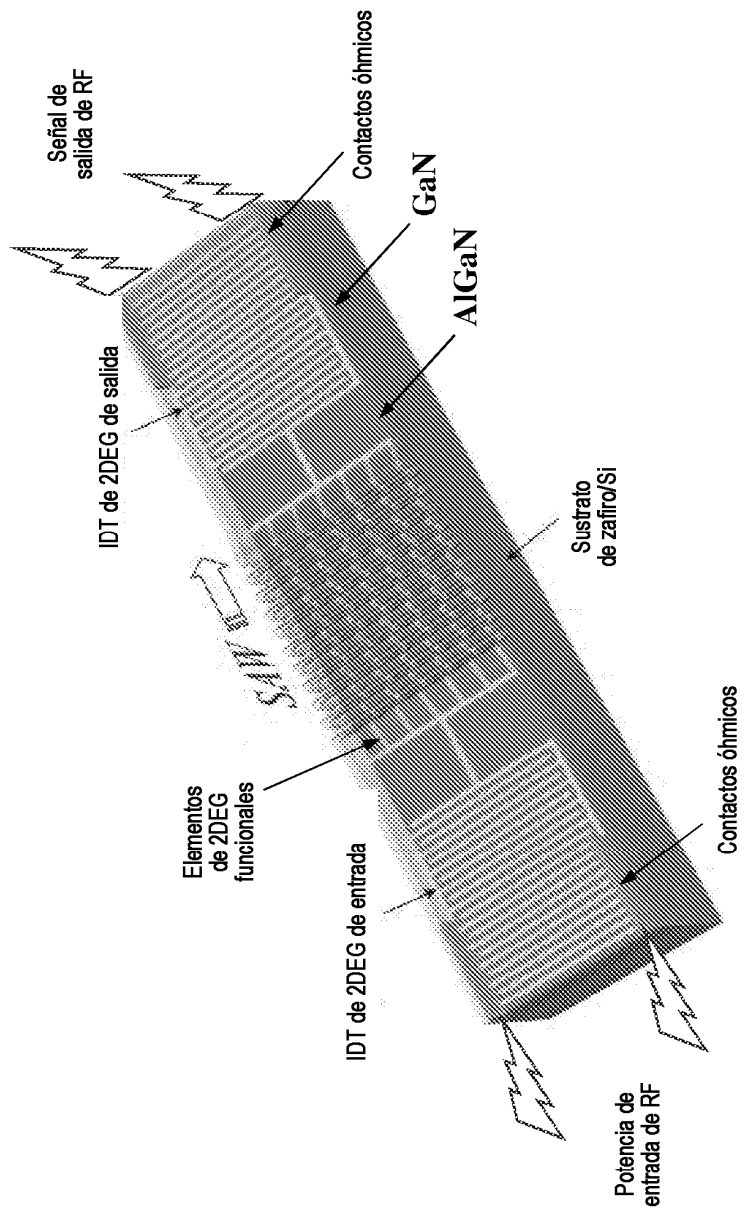
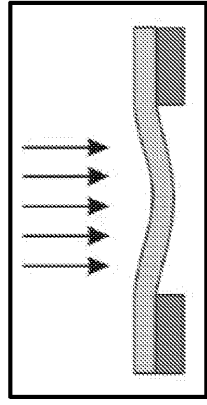
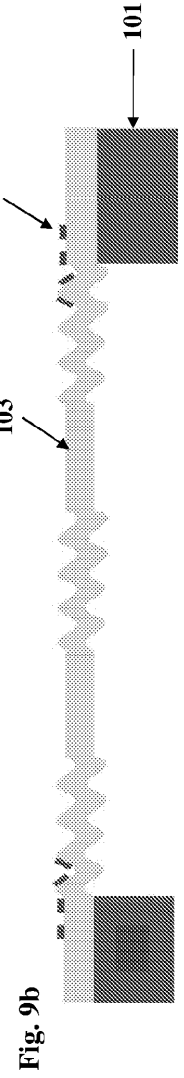
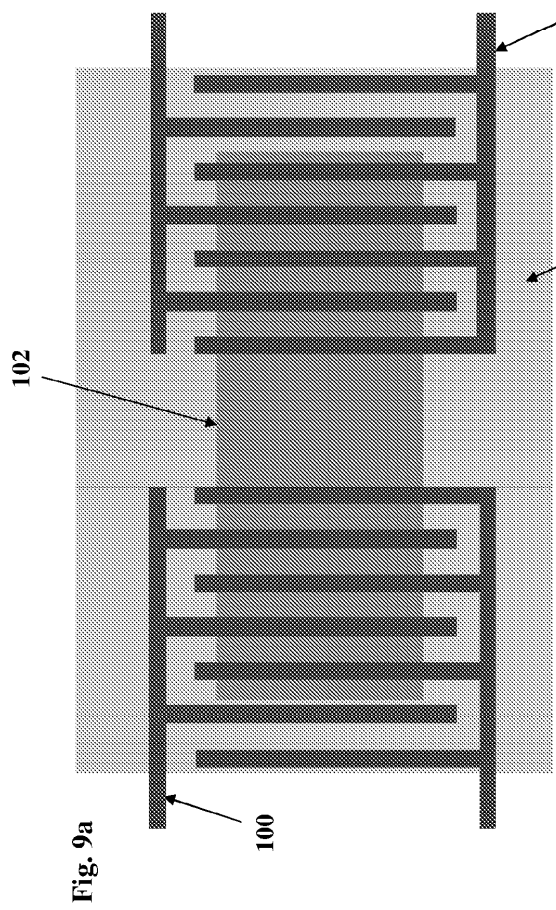


Fig. 8



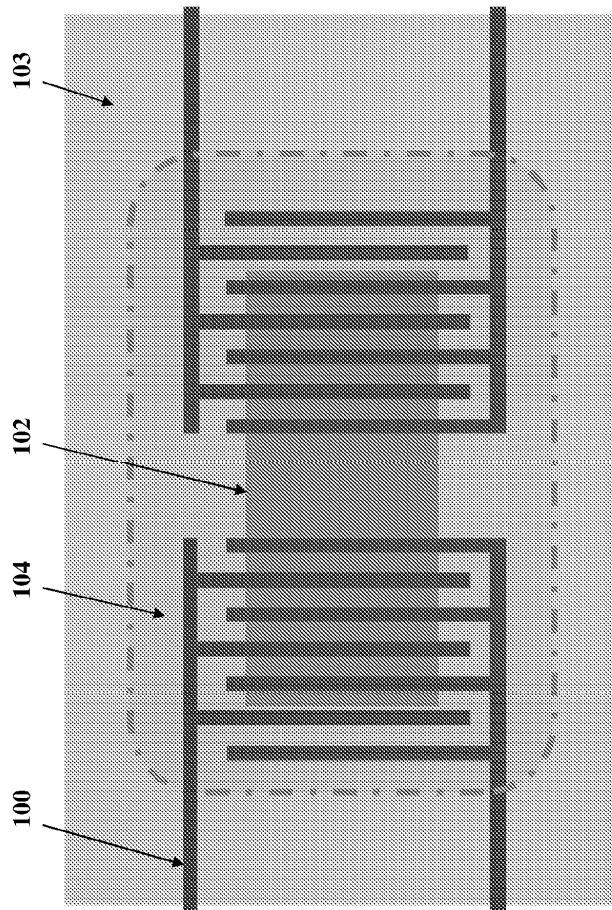


Fig. 10a

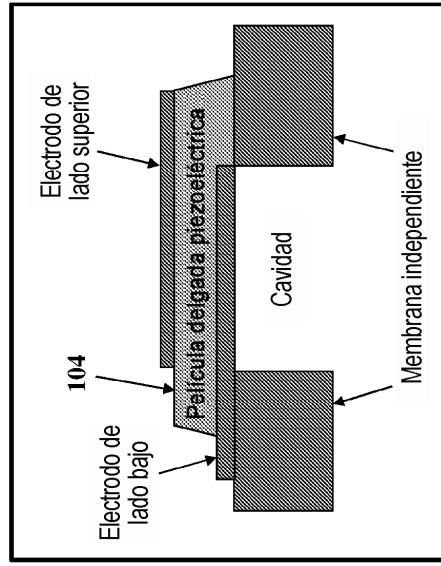


Fig. 10b

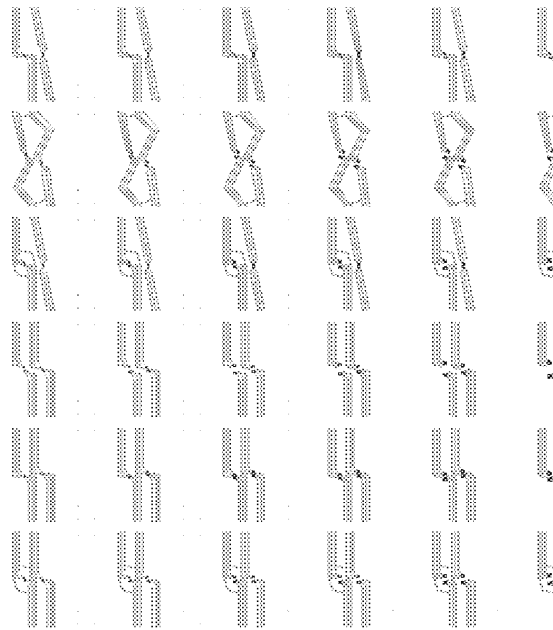
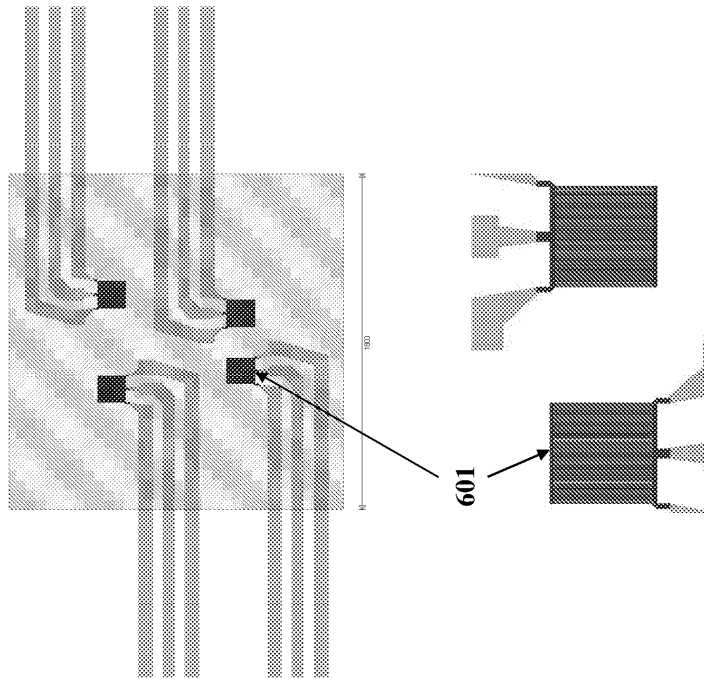
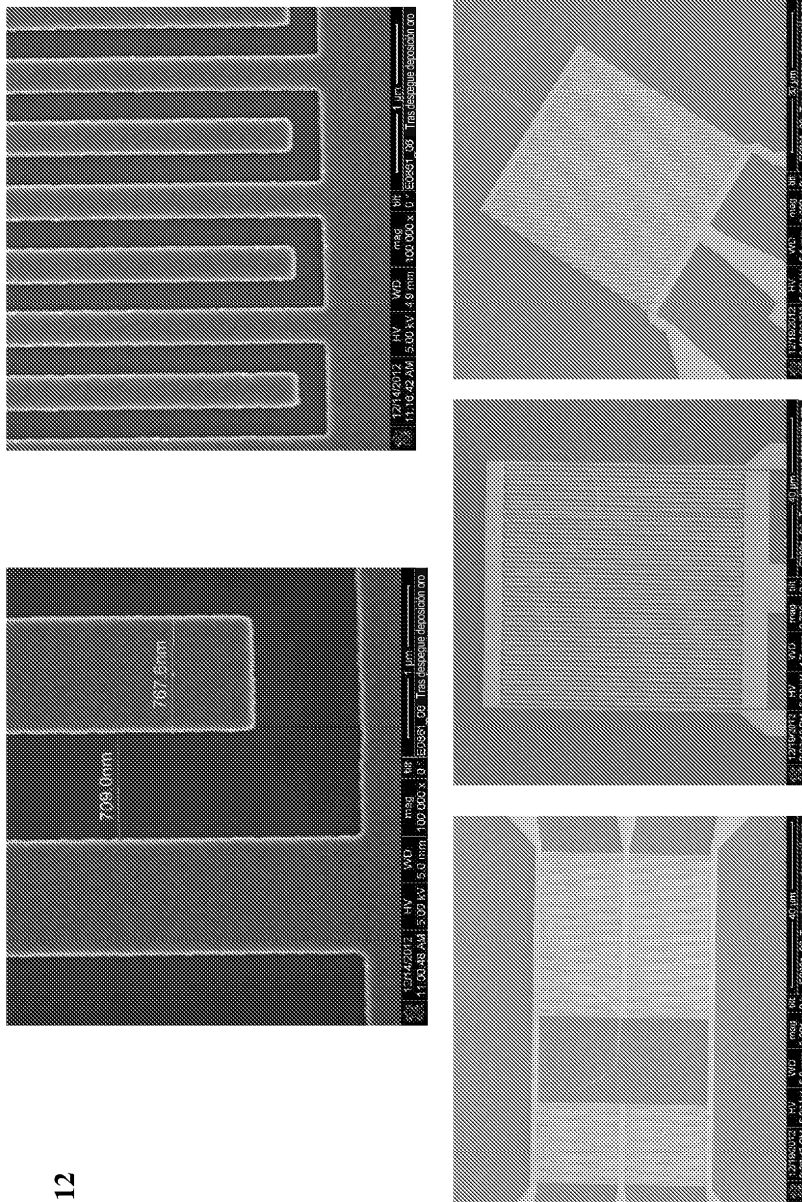


Fig. 11



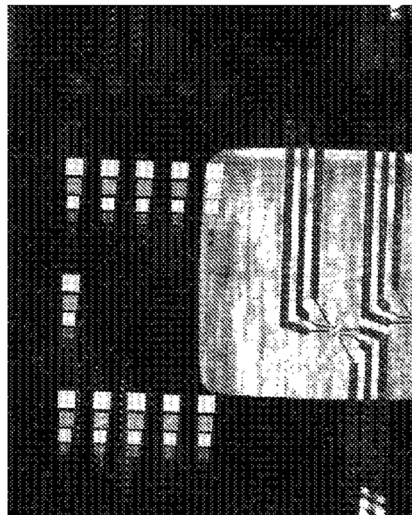
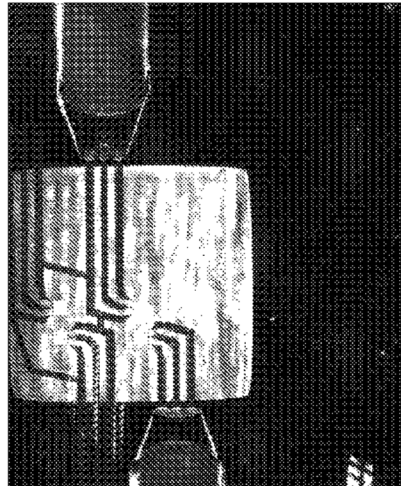
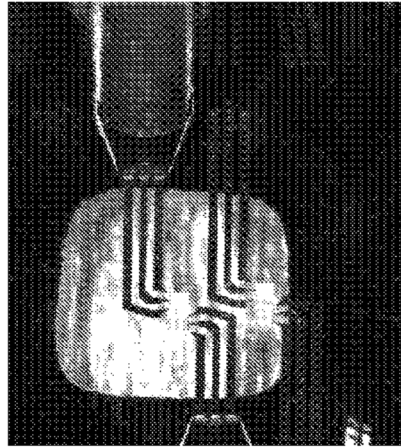


Fig. 13

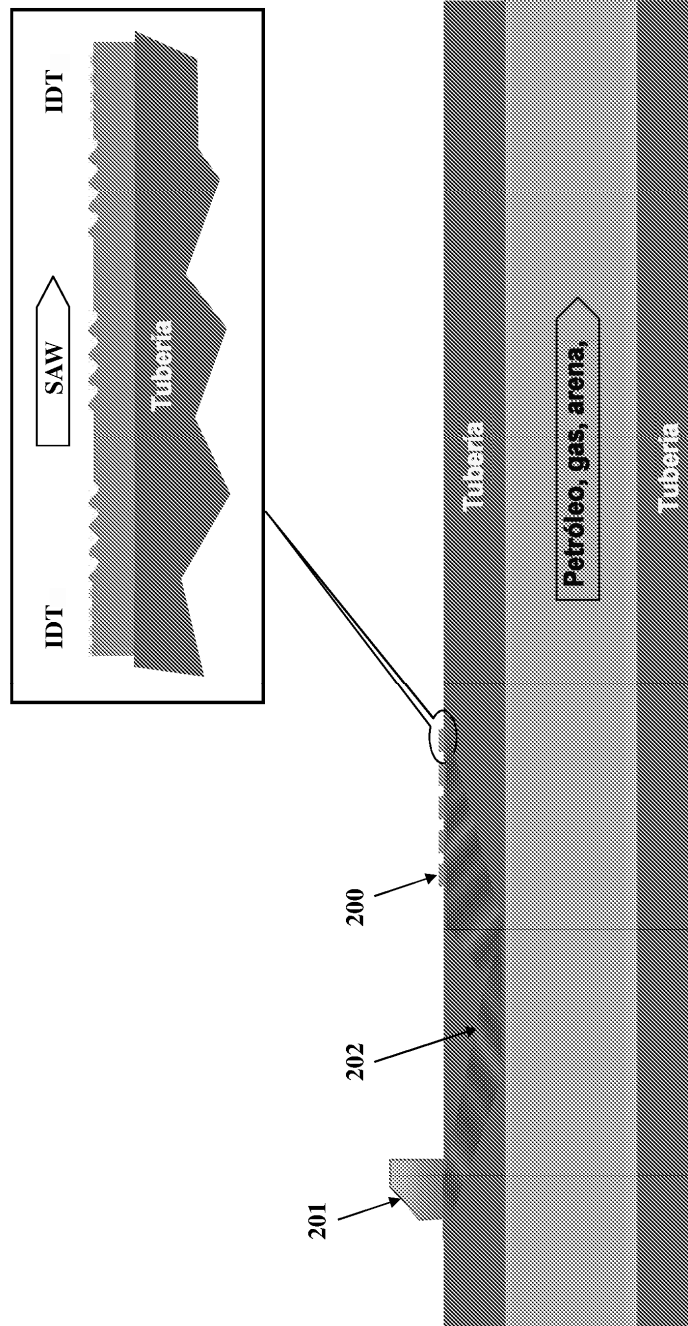


Fig. 14

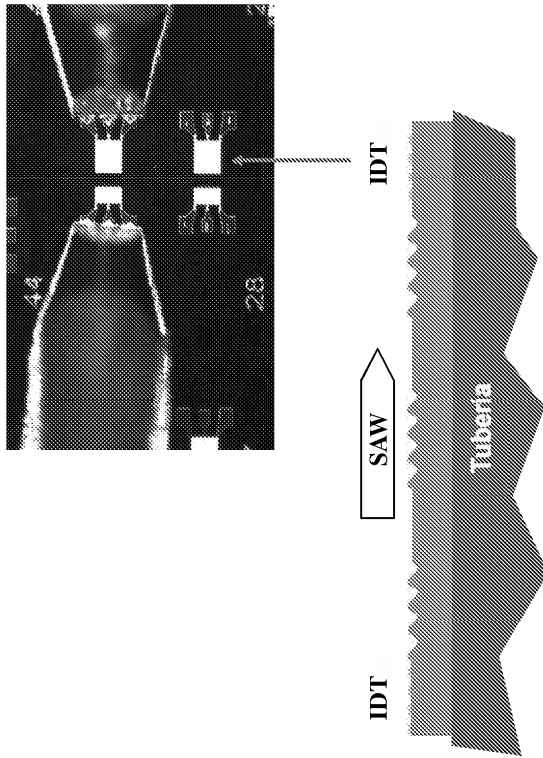


Fig. 15a

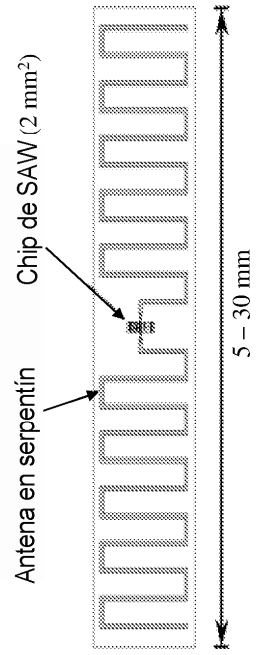


Fig. 15b

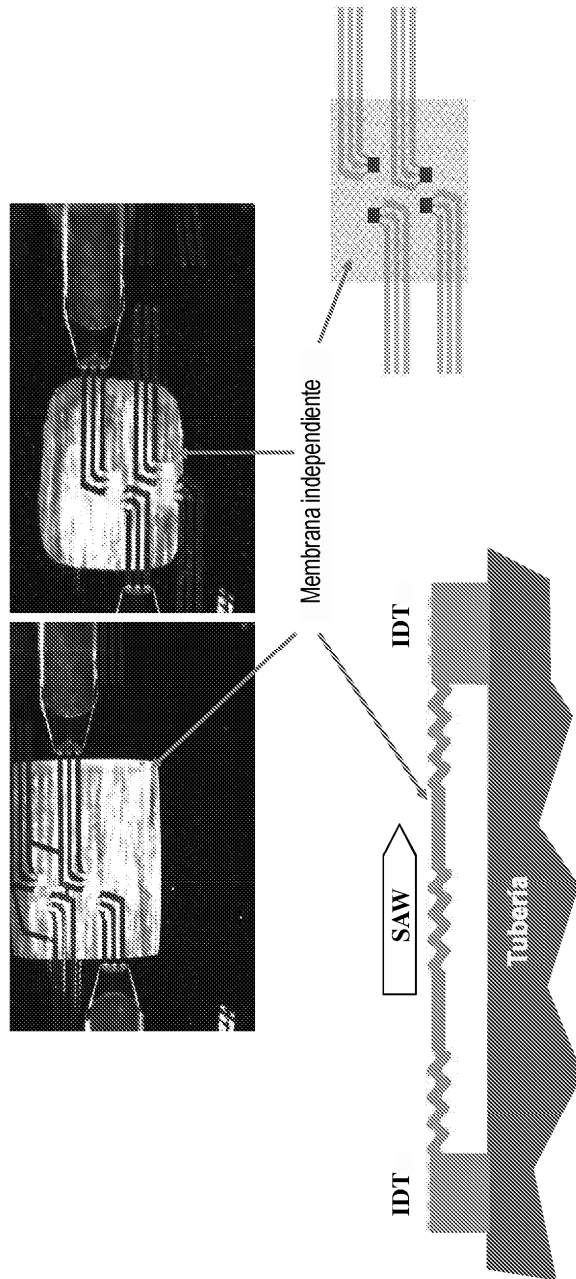


Fig. 16

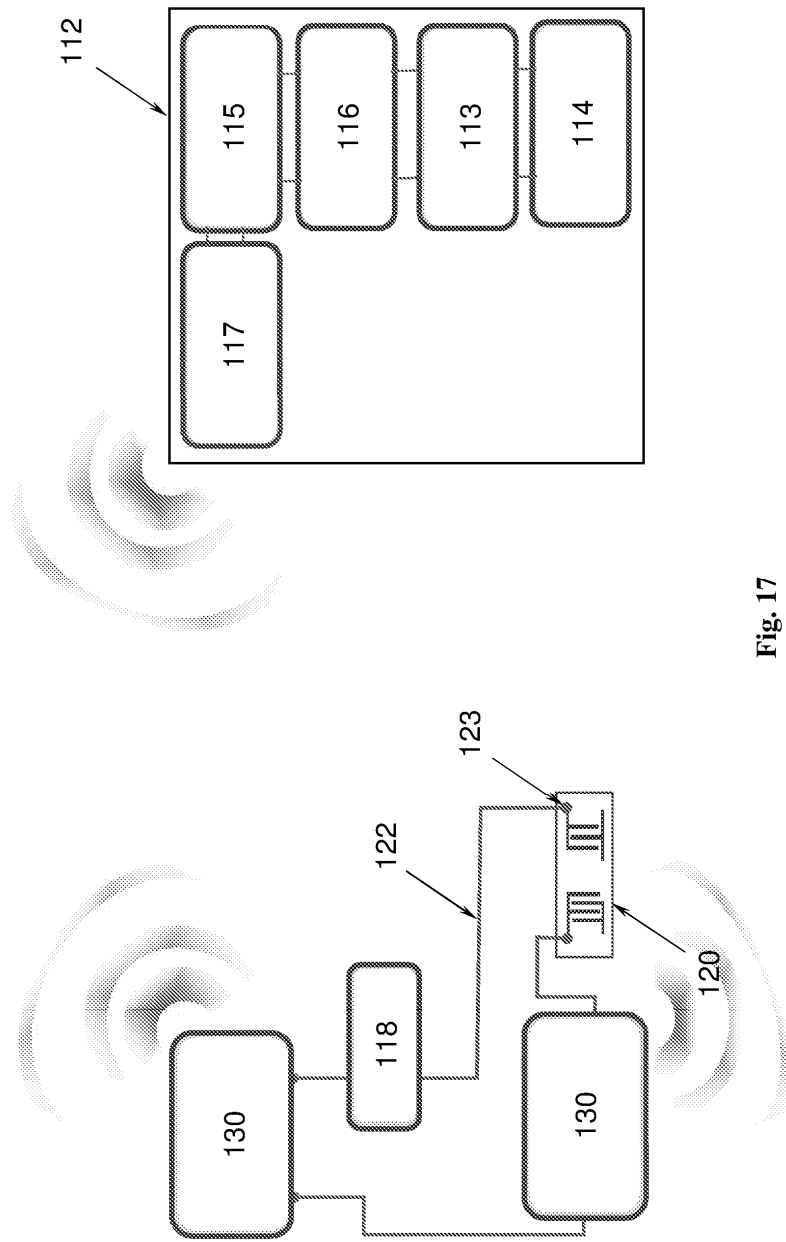


Fig. 17

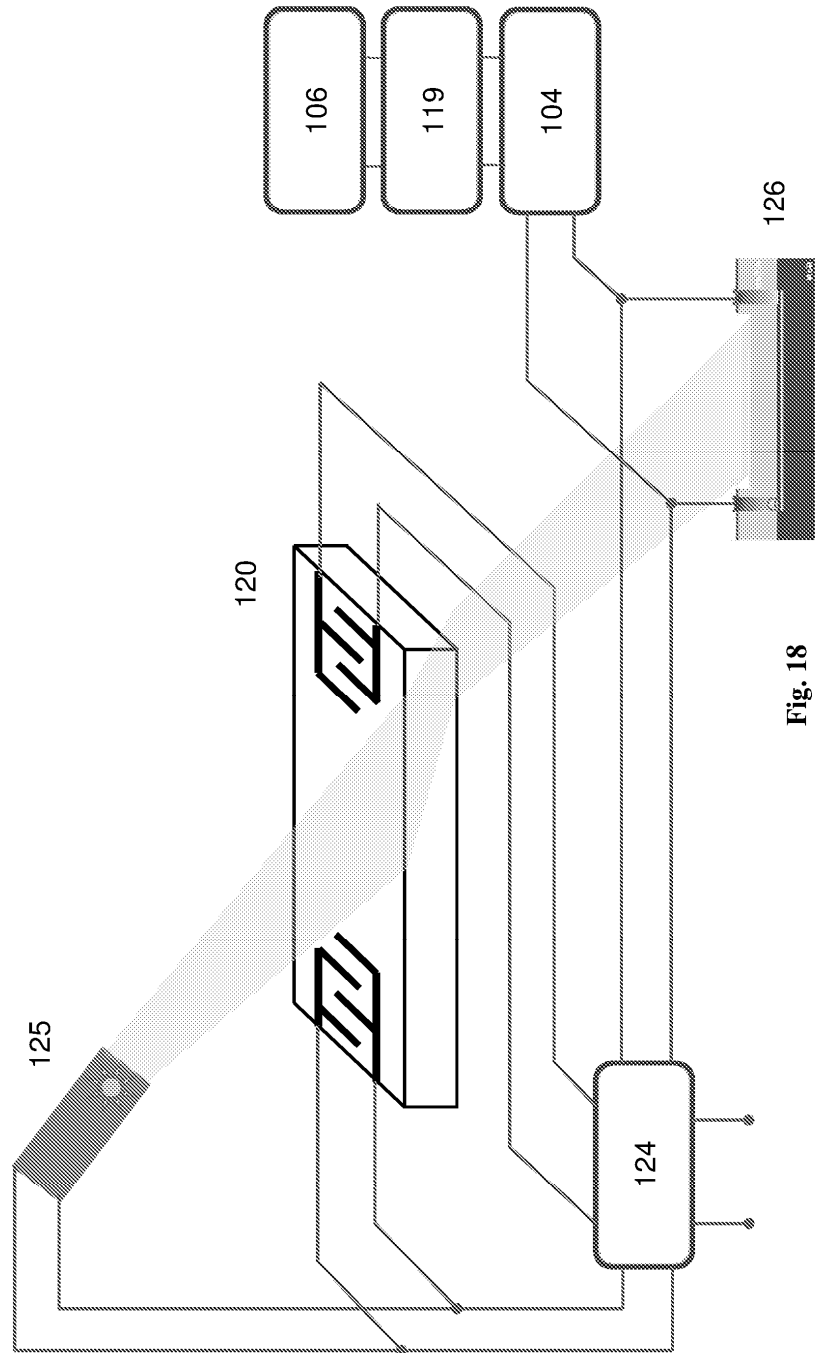


Fig. 18

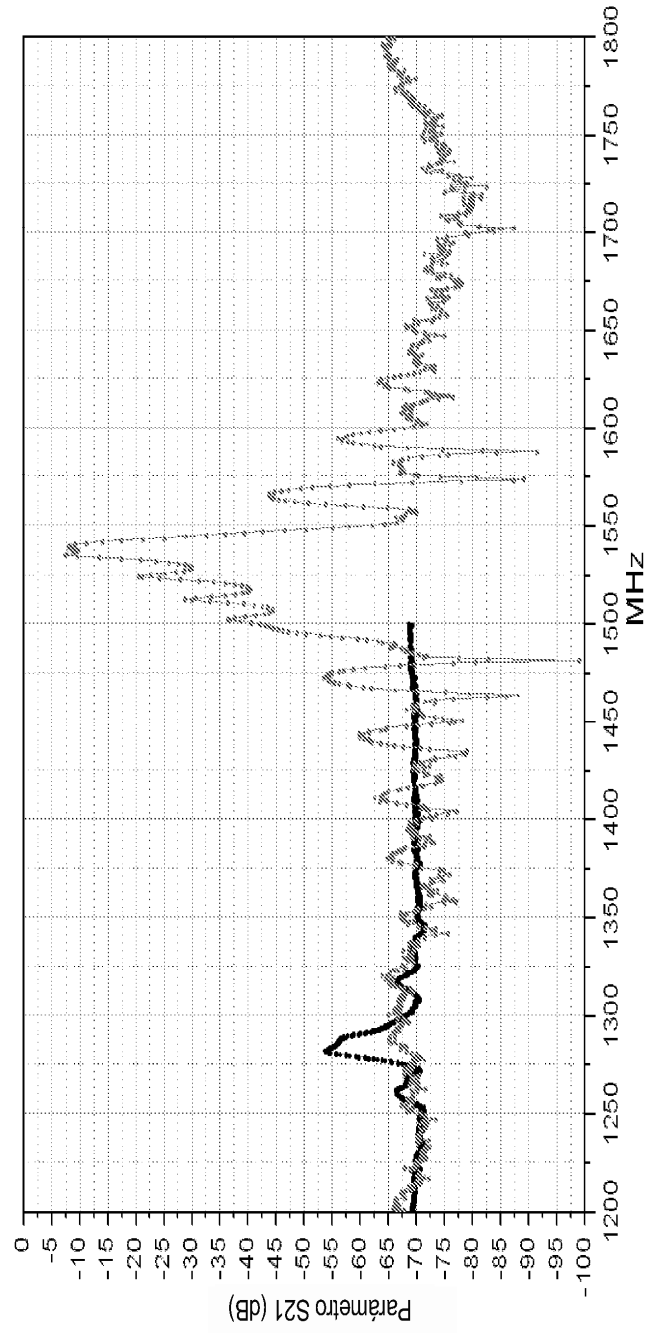


Fig. 19