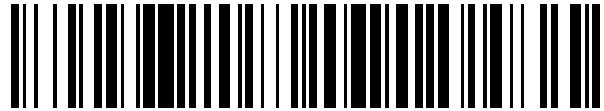


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 535 121**

51 Int. Cl.:

G02B 1/10 (2015.01)

H05K 9/00 (2006.01)

H01L 31/0352 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.11.2011 E 11784484 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.01.2015 EP 2641113**

54 Título: **Ventanilla optrónica transparente a IR y reflectante para la RF**

30 Prioridad:

16.11.2010 FR 1004448

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

05.05.2015

73 Titular/es:

**THALES (100.0%)
45 rue de Villiers
92200 Neuilly-sur-Seine, FR**

72 Inventor/es:

**CZARNY, ROMAIN;
REVERCHON, JEAN-LUC;
PATE, MICHEL;
LOISEAUX, BRIGITTE y
BERGINC, GÉRARD**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 535 121 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

Ventanilla optrónica transparente a IR y reflectante para la RF

El campo de la invención es el de la Compatibilidad Electromagnética (CEM) de los equipos optrónicos montados a bordo de aeronaves (telémetro láser, LIDAR, cámara VIS/IR, equipos optrónicos de ayuda al aterrizaje, etc.).

5 En efecto, la presencia de ventanas ópticas en este tipo de equipos expone el interior de estos dispositivos a las ondas electromagnéticas circundantes y recíprocamente. Se designa por ventana óptica el conjunto de una ventanilla transparente encastrada en una estructura mecánica; una ventanilla tiene típicamente un diámetro de 15 a 40 cm. Esta exposición a las ondas electromagnéticas puede tener como consecuencias:

- la perturbación del funcionamiento del dispositivo optrónico,
- 10 - la perturbación del funcionamiento de los diferentes equipos electrónicos circundantes (radar, comunicación por radio, etc.).

15 La utilización de una ventana óptica transparente en el intervalo de longitud de onda óptica utilizado (300 nm a 20 μm) y reflectante a las ondas de RF (1 MHz a 100 GHz) permite asegurar una continuidad eléctrica en la carcasa del equipo y constituir de ese modo una jaula de Faraday. En ese caso la ventana optrónica no es transparente en la banda de RF.

Hoy en día, se emplean principalmente tres técnicas con el fin de realizar la combinación de los 2 efectos buscados: transparencia óptica y reflectividad/absorción de las microondas.

Una primera técnica consiste en asociar a la ventanilla óptica una rejilla metálica de la misma dimensión.

20 Desde un punto de vista de la hiperfrecuencia, esta rejilla se comporta como un filtro paso alto a las frecuencias cuyo comportamiento está ligado al tamaño de los hilos de la rejilla, a su paso y a la naturaleza del metal utilizado (generalmente de oro o de cobre). En efecto, para longitudes de onda grandes frente al paso de la rejilla y para unos grosores de penetración del campo electromagnético (denominados grosores de piel) más pequeños que el grueso del hilo de la rejilla, ésta se ve como una capa metálica uniforme y por lo tanto reflectante.

25 Desde un punto de vista óptico, los hilos de la rejilla se comportan como unos elementos difractantes. Para una longitud de onda dada, es la eficacia de la difracción, determinada por la periodicidad de la rejilla así como por el tamaño de los hilos con relación a la longitud de onda considerada, lo que determinará las pérdidas ópticas. Por ejemplo, una rejilla de cobre de 30 μm de diámetro de hilo con una malla regular (un paso) de 224 μm presenta una transparencia óptica en el campo visible del 78 %.

30 Los rendimientos de dichos dispositivos están limitados principalmente por unas limitaciones tecnológicas. En efecto, cuando la rejilla debe ser mecánicamente auto-soportada, su diámetro de hilo y su paso no pueden reducirse más allá de unos límites de resistencia de los materiales; entonces la difracción óptica se convierte en demasiado importante.

Se señala también la existencia de rejillas bi-periódicas que implementan unos materiales semiconductores y que permiten acoplar la onda de RF incidente en una capa absorbente.

35 Otra técnica empleada consiste en depositar sobre la ventanilla óptica, una capa conductora transparente. Con este fin, se emplean corrientemente unos metales depositados en finas capas o unos óxidos dopados (oro en capa delgada, ITO, ZnO). Para las frecuencias de microondas, la capa semitransparente se comporta como un metal que permite reflejar uniformemente las ondas cuya frecuencia es inferior a la frecuencia de plasma. Esta técnica se emplea típicamente sobre las cristaleras de avión o de helicóptero.

40 Mientras esta técnica puede proporcionar satisfacción en el campo visible (particularmente para todas las aplicaciones ligadas a la visualización), no es este el caso para longitudes de onda superiores a 1,5 μm en las que, cuando la capa es suficientemente conductora con una resistencia superficial típicamente inferior a 10 $\Omega/\text{cuadrado}$, las ondas de IR son fuertemente reflejadas y/o absorbidas. Las conductividades típicas son del orden de la decena de ohmios/cuadrado para una transmisión del 40 % a 1,5 μm .

45 Finalmente una tercera técnica, diferente de las otras dos, implementa una superficie selectiva en frecuencia del tipo pantalla de Salisbury, con unos materiales ópticamente compatibles.

50 Este tipo de superficie está constituida por un dioptrio parcialmente reflectante a hiperfrecuencia, por un sustrato de un grosor efectivo de $\lambda/4$, seguido por una superficie altamente reflectante a la RF. De ese modo, las reflexiones de RF sobre el primer dioptrio están acopladas en oposición de fase con la reflexión sobre el dioptrio altamente reflectante implicando de ese modo una disminución de la reflectividad a la RF de la ventanilla.

Estas superficies reflectantes pueden realizarse con la ayuda de rejillas o de capas semitransparentes tal como se han presentado anteriormente.

Este tipo de filtro no es eficaz más que para una banda estrecha de frecuencias. Existen unas técnicas para ampliar la banda de funcionamiento de este tipo de dispositivo (pantalla de Jaumann, por ejemplo); sin embargo, éstas conducen a la realización de estructuras relativamente abultadas.

- 5 Entre los documentos del estado de la técnica, se puede citar el US 6 099 970 que describe particularmente una ventanilla optrónica y la publicación “Electromagnetic Compatibility Engineering” de Ott, H.W que presenta unos medios para luchar contra las interferencias electromagnéticas.

En consecuencia, continúa existiendo a día de hoy una necesidad de una ventanilla que dé satisfacción simultáneamente al conjunto de las exigencias antes mencionadas, en términos de buena transmisión al IR, reducida transmisión de la RF y buena resistencia mecánica.

- 10 La invención se basa en la utilización de un sustrato transparente de entre 0,4 y 5 μm asociado a un apilado de heteroestructuras, comprendiendo cada heteroestructura unas capas semiconductoras de gran energía de banda prohibida (típicamente superior a 1 eV) y unos portadores eléctricos móviles con una movilidad típicamente superior a 100 $\text{cm}^2/\text{V/s}$.

- 15 La utilización de capas semiconductoras de gran energía de banda prohibida confiere una buena transparencia al IR superior al 90 %; su grosor del orden de 10 μm así como la movilidad de los portadores superior a 100 $\text{cm}^2/\text{V/s}$ garantizan su conductividad y por tanto su reflectividad a la RF.

- 20 Más precisamente la invención tiene por objeto una ventanilla optrónica que comprende un sustrato de dos caras, con un apilado, sobre una de las caras del sustrato o sobre las dos, de varias heteroestructuras, estando compuesta cada heteroestructura por al menos dos capas semiconductoras SC1, SC2, estando dopada la capa SC1, comprendiendo la capa SC2 en sí misma una capa tridimensional de gas de electrones formada en la interfaz con la capa SC1, siendo las capas y el sustrato transparentes entre 0,4 y 5 μm . Está caracterizada principalmente porque comprende un electrodo en contacto con todas las capas de gas de electrones.

- 25 Comprende además una rejilla metálica bi-periódica en contacto con el electrodo, que está enterrado en el apilado. Generalmente es de mallas regulares. Tiene típicamente un hilo de grosor inferior a 5 μm y un paso inferior a 500 μm .

La presencia de los canales de electrones bidimensionales del tipo 2DEG (“Two-Dimensional Electron Gas”) permite incrementar la movilidad de los portadores en la estructura y por tanto incrementar la reflectividad a la RF y la transparencia a IR.

Según una característica de la invención, la capa semiconductoras SC2 no está dopada.

- 30 Según otra característica de la invención las heteroestructuras son de grosor diferente y/o no están compuestas de los mismos materiales y/o no comprenden el mismo número de capas.

Esta ventanilla comprende típicamente un apilado de 10 a 80 heteroestructuras.

Puede comprender una capa tampón entre sustrato y el apilado de heteroestructuras, así como una o dos capas antirreflejos.

- 35 El sustrato es en general de zafiro o SiC o Si, la capa SC2 de GaN y la capa SC1 de AlGaIn con una concentración de Al comprendida entre el 25 al 30 %.

La epitaxia del GaN sobre zafiro permite realizar unas ventanas de gran resistencia mecánica y térmica (fuerte enlace covalente entre Ga y N en el origen de la gran energía de banda prohibida: entre 3,2 y 3,4 eV). La temperatura de crecimiento superior a 1000 °C le confiere una gran estabilidad térmica.

- 40 La invención tiene también por objeto una ventana optrónica que comprende una ventanilla tal como se ha descrito encastrada en una estructura mecánica eléctricamente conductora, estando unido el electrodo de la ventanilla a esta estructura eléctricamente conductora.

Surgirán otras características y ventajas de la invención con la lectura de la descripción detallada a continuación, realizada a título de ejemplo no limitativo y con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

- 45 las figuras 1 representan esquemáticamente una estructura cristalina de GaN, cúbica y no polar de tipo blanda de cinc (fig. 1 a) y hexagonal y polar del tipo Würtzite (fig. 1 b),
 las figuras 2 representan esquemáticamente una estructura de banda de energía de red de heteroestructuras que permiten la colocación en paralelo de los canales 2DEG de gran movilidad, en función de la dirección normal al sustrato, para un ancho de red típico superior a 100 nm (fig. 2a) e inferior (fig. 2b),
 50 la figura 3a da el grosor total de la red requerido en función de la densidad de portadores media en la red para tener una transmisión de RF que varíe entre -10 y -50 dB para una movilidad de 1500 $\text{cm}^2/\text{V/s}$, la figura 3b da la absorción ligada a los portadores libres a $\lambda=4,5 \mu\text{m}$ en función de la densidad de portadores en cada canal para

la misma movilidad,

las figuras 4 representan esquemáticamente una ventanilla según la invención, realizada sobre sustrato circular en perspectiva (fig. 4a), vista desde arriba (fig. 4b), según una sección AA con un apilado de tres heteroestructuras (fig. 4c),

5 las figuras 5 dan los coeficientes de reflexión, transmisión y absorción ópticos (fig. 5a) y la transmisión de RF (fig. 5b) obtenidos para una ventanilla de 80 heteroestructuras que totalizan 8 μm de grosor, comprendiendo una rejilla de 400 μm de paso con unos hilos de oro de $5 \times 5 \mu\text{m}^2$, la figura 6 representa esquemáticamente una ventana oprónica según la invención.

De una figura otra, los mismos elementos son referidos mediante las mismas referencias.

10 Según un primer modo de realización de la invención, se asocia un sustrato que posee la transparencia requerida entre 0,4 y 5 μm y unas muy buenas propiedades físicas y mecánicas, tal como el zafiro, a un apilado de heteroestructuras que comprende unas capas semiconductoras de gran energía de banda prohibida y unos portadores móviles. Entre las capas semiconductoras utilizadas, se puede citar por ejemplo una capa semiconductoras de GaN; teniendo el GaN la particularidad de poder crecer con una buena calidad cristalográfica
15 sobre el zafiro, este procedimiento permite de ese modo tener una estructura de gran resistencia mecánica y térmica.

El comportamiento de la capa de GaN depende de la densidad de portadores libres así como de su movilidad. A partir de estas dos magnitudes y de las propiedades intrínsecas del material, se puede definir una magnitud característica denominada frecuencia de plasma f_p (corresponde a la frecuencia electromagnética para que la parte real de la permitividad del material es nula):
20

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_e q^2}{\epsilon_0 \epsilon_R m_{\text{eff}}} - \frac{q^2}{m_{\text{eff}}^2 \mu_e^2}}$$

siendo n_e la densidad del portador, m_{eff} su masa efectiva y μ_e la movilidad de estos portadores, q la carga eléctrica del electrón, ϵ_0 la permitividad del vacío, ϵ_R la permitividad relativa del material considerado. Esta frecuencia se pueda asociar a una longitud de onda denominada longitud de onda de plasma λ_p :

25
$$\lambda_p = \frac{c}{f_p}$$

siendo c la velocidad de la luz en el vacío.

De ese modo, el comportamiento de la capa semiconductoras de GaN depende de la longitud de onda considerada:

- Para las longitudes de las ondas electromagnéticas inferiores a λ_p (las ondas de IR y del visible en nuestro caso) esta capa se comportará como un dieléctrico y por lo tanto será atravesada con unas pérdidas. La transparencia
30 del material en este intervalo de longitudes de onda dependerá particularmente de la densidad de portadores libres y de su movilidad en la estructura de GaN.
- Para las longitudes de onda superiores a λ_p (las ondas de RF en nuestro caso), esta capa se comportará como un metal y creará un cortocircuito desde un punto de vista de radiofrecuencia. La onda incidente es por tanto reflejada, dependiendo los rendimientos de la calidad del cortocircuito realizado y por tanto de la resistividad de
35 la superficie de la capa de GaN.

La onda incidente es tanto más reflectante cuanto más conductora sea la capa, es decir comprenda una densidad de portadores libre elevada (superior a 10^{18} cm^{-3}), y una movilidad elevada (superior a $100 \text{ cm}^2/\text{V/s}$). Tendremos entonces una ventana oprónica no transparente a las ondas de RF.

40 Se recuerdan las características ópticas de la capa semiconductoras. Aquellas que están ligadas a las interacciones con los portadores libres pueden ser descritas con la ayuda del modelo de Drude. A partir de los parámetros intrínsecos del material así como de los de los portadores (densidad, masa efectiva y movilidad) se puede calcular en función de la longitud de onda, la permitividad compleja $\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ y el índice complejo $N = n - ik$ del material. Para una longitud de onda λ , las pérdidas lineales ópticas α , que están ligadas a la absorción por portadores libres están entonces unidas a la parte compleja del índice según:

45
$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} k$$

La transmisión T_{opt} y la absorción A_{opt} ópticas (ligadas a un paso único, sin consideración a las reflexiones en las interfaces) de la capa semiconductoras de grosor d viene dado por tanto por:

$$T_{\text{opt}} = e^{-\alpha d} \quad \text{y} \quad A_{\text{opt}} = 1 - e^{-\alpha d}$$

Se recuerdan las características a hiperfrecuencia de la capa semiconductor:

- Para unos grosores d finos frente al grosor de piel, las características de radiofrecuencia de la capa semiconductor se determinan particularmente por su resistencia superficial R_s .

$$R_s = \frac{1}{dn_e \mu_e q}$$

- 5 - Para una capa auto-soportada, la transmisión de RF puede entonces venir dada por la fórmula siguiente:

$$T_{RF} \approx -20 \log \left(1 + \frac{60\pi}{R_s} \right) \text{ en dB.}$$

Se considera ahora la problemática del crecimiento del GaN sobre un sustrato de zafiro.

10 El crecimiento se realiza muy normalmente siguiendo el eje c de la estructura cristalina de Würtzite sobre sustrato de zafiro de orientación [0001]. Sin embargo, unos dispositivos con un eje c no perpendicular al sustrato (en el plano para una estructura no polar o que sigue unas direcciones (x, y, z) semi-polares) aparecen progresivamente.

Una de las problemáticas del crecimiento está ligada a la discordancia de la malla entre los diferentes materiales que componen la hetero-epitaxia. El crecimiento de GaN sobre sustrato de zafiro (Al_2O_3) se realiza entonces con un eje cristalino horizontal (a) girado 30° con relación al sustrato.

15 Las diferencias de coeficiente de dilatación contribuyen igualmente a los problemas mecánicos durante el crecimiento efectuado a cerca de $1000^\circ C$. Los datos para diferentes tipos de materiales se consignan en la tabla que sigue para unos semiconductores de la familia III-N en la estructura Würtzite.

Material	Parámetro de malla (Å)	Coficiente de dilatación K^{-1}
Al_2O_3	4,7558	$7,5 \times 10^{-6}$
$Al_2O_3 (30^\circ) / \sqrt{3}$	2,74	
GaN	3,189	$5,59 \times 10^{-6}$
AlN	3,112	$4,2 \times 10^{-6}$
InN	3,548	
BN	2,2556	

20 Una de las principales técnicas de crecimiento realizada para superar esta discordancia de malla es el uso de una capa tampón epitaxiada a baja temperatura (entre 450 y $600^\circ C$) de algunas decenas de nanómetros de grosor. Permite adaptar el parámetro de malla al del semiconductor III-N (GaN o AlN preferentemente).

Esta técnica permite realizar unas epitaxias a alta temperatura (superior a $1000^\circ C$) con un parámetro de malla y orientación cristalina adaptadas. Lo que conduce a la obtención de capas de muy buena transparencia óptica. La rugosidad superficial típica es inferior a 5 nm RMS (acrónimo de la expresión anglosajona Root Mean Square para tipo de intervalo).

25 Otra técnica, bien conocida en la literatura, consiste en realizar por ejemplo una multicapa de binarios AlN / GaN con el fin de atrapar las dislocaciones "pasantes" en la interfaz entre estas capas. Estas multicapas permiten crear al mismo tiempo unos gases de electrones bidimensionales que puede contribuir a la conductividad eléctrica como se va a ver.

30 En efecto, en un semiconductor masivo, la movilidad está ligada por lo tanto a la densidad de defectos y por lo tanto al dopaje: cuanto más elevado sea el dopado más reducida será la movilidad. En cualquier otro dominio que el de la compatibilidad electromagnética, que es el de los transistores HEMT ("High-Electron-Mobility-Transistors"), una de las técnicas utilizadas para incrementar la movilidad de los portadores, consiste en:

- disociar físicamente la zona dopada de la zona de transporte con el fin de limitar la densidad de impurezas en la zona de transporte y por tanto optimizar la movilidad de los portadores,
- 35 - situar el nivel de Fermi por encima de la banda de conducción en la zona de transporte con el fin de crear en ella una zona en la que están presentes unos portadores libres (confinados en 2 dimensiones) en gran densidad.

40 Esto se realiza con ayuda de una heterounión que permite crear un canal bidimensional, denominado 2DEG ("Two-Dimensional Electron Gas"), en el que la movilidad y la densidad de los portadores son muy elevadas. Con relación a unas capas masivas simples, este tipo de heterounión, permite realizar por tanto unas uniones cuya resistividad eléctrica es mucho más reducida.

La conducción eléctrica se realiza en el plano de las capas, unas ondas de RF incidentes polarizadas TEM son susceptibles por tanto de interactuar con el “gas” de electrones libres del 2DEG.

Las funciones requeridas para la microelectrónica son muy diferentes a las que nos preocupan en este caso. Aunque el empleo de un gas de electrones se utilice igualmente en microelectrónica, la colocación en paralelo (en unos planos paralelos) de un gran número de canales de conducción no se aplica a la microelectrónica.

El principio de base de la invención consiste en apilar este tipo de heteroestructuras unas por encima de las otras sobre un sustrato con el fin de constituir una red de gases bidimensionales que permita realizar una heteroestructura con:

- una resistividad global incluso más reducida que en un semiconductor masivo, gracias a la colocación en paralelo del conjunto de los canales y
- una transparencia a IR incrementada gracias a la fuerte movilidad de los portadores en las capas 2DEG.

En el caso de una heterounión AlGaIn/GaN en estructura cristalina hexagonal y polar de tipo Würtzite, o cúbica y no polar de tipo blanda de cinc (presentada respectivamente en las figuras 1 a y 1 b), los portadores se suministran generalmente mediante el dopaje residual o intencional presente; un efecto piezoeléctrico permite polarizar naturalmente la unión y completar el canal. En el caso de una red de varias heterouniones, este efecto piezoeléctrico es insuficiente para completar el conjunto de los canales a partir de los portadores procedentes de la superficie. Se propone por tanto dopar las barreras de AlGaIn localmente (es decir solamente sobre una parte del grosor de la barrera) según un dopado n o eventualmente p, y preferentemente de modo periódico.

La tasa de aluminio utilizada (típicamente entre el 25 y 30 %) permite garantizar un crecimiento epitaxial bidimensional. Contrariamente a las aplicaciones microelectrónicas (particularmente el transistor), la ausencia de grietas así como el aislamiento eléctrico entre capas no es requerido. Esto facilita notoriamente la realización de este tipo de estructuras.

Cuando la amplitud típica del período de la red es superior a 100 nm, se pueden encontrar unos canales que tengan el mismo perfil que el que se encuentra en los transistores de tipo HEMT. Este tipo de red se presenta en la figura 2a, en la que E_f designa el nivel de Fermi, E_c la energía de la banda de conducción, E_v la energía de la banda de valencia.

Cuando los canales se estrechan (< 100 nm), se encuentra entonces una arquitectura de banda de energía de tipo multi-pozo cuántico en la que los electrones presentes en el pozo se pueden distribuir sobre unos niveles energéticos discretos. Este tipo de red se presenta en la figura 2b.

Aunque este tipo de estructura se asemeja a las estructuras de los detectores infrarrojos QWIP, acrónimo de la expresión anglosajona Quantum Well Infrared Photodetector (fotodetector de infrarrojos con pozos cuánticos), el funcionamiento y la utilización son completamente diferentes. En efecto, la onda óptica de IR bajo incidencia normal (teniendo en cuenta el índice óptico del GaN, la incidencia máxima en esta capa es de 25°) presenta una polarización orientada paralelamente al plano de las capas. De ese modo esta onda no interactúa con los niveles energéticos discretos en los pozos cuánticos y no tiene absorción óptica (como en los QWIP) ligada a unas transiciones intra o inter-bajo-banda. Esta polarización implica sin embargo una interacción con los “gases bidimensionales” de electrones libres confinados en el plano de las capas, lo que se puede traducir en una absorción óptica ligada a los portadores libres.

De la misma manera, una onda de RF TEM bajo incidencia normal excita estos “gases bidimensionales” e interactúa, teniendo en cuenta el grosor de la estructura con relación a la longitud de onda de RF, con una capa única equivalente de muy buena conductividad eléctrica.

La onda óptica incidente por su parte ve esta red como una capa de índice efectivo equivalente a la media de los índices de la estructura, ponderada por los grosores. En efecto, el grosor de las capas (del orden de algunas decenas de nanómetros) es mucho más reducido que la más pequeña de las longitudes de onda óptica consideradas (~ 400 nm). Lo que es más, la diferencia de índice óptico entre dos materiales de la familia (Al, Ga)N es muy reducida (menos de 0,2) e induce pocas interferencias.

La movilidad en los canales depende en gran parte de la arquitectura de banda reservada y pueden utilizarse las técnicas tradicionales de optimización de la movilidad en estas estructuras 2DEG:

- optimización del ancho de los canales,
- optimización de la profundidad (energética) de los canales,
- optimización del dopado de las barreras,
- utilización de zonas no dopadas y eventualmente de composición diferente en la proximidad de los canales,
- utilización de capas tampón sobre el sustrato,
- etc.

Para preservar los rendimientos de transparencia a IR, esta optimización se debe hacer limitando la densidad de portadores n_{2DEG} en los canales. En efecto, se obtiene una caída de la transmisión de IR cuando las densidades de portadores en los canales conducen a la obtención de una longitud de onda de plasma más pequeña que la longitud de onda de IR λ_{IR} consideradas:

$$n_{2DEG} < \epsilon_0 \epsilon_R \left(\frac{4\pi^2 m_{eff} c^2}{\lambda_{IR}^2 q^2} \right)$$

De ese modo, para una longitud de onda de IR máxima de 4,5 μm se limita la capacidad de portadores en los canales a $\sim 6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

La figura 3a representa el grosor total d_{tot} de la red que es necesario realizar para una movilidad de 1500 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ en los canales; se proponen unas movilidades de 1900 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ en unas estructuras comercializadas. Este grosor se representa en función del dopado medio n_{med} en el conjunto de la red y para diferentes valores de reflectividad a la RF buscados.

En función de la arquitectura de la red reservada, la densidad de portadores n_{2DEG} en los canales puede variar para una misma densidad de portadores media. En función de esta densidad de portadores y considerando un grosor total de la estructura de acuerdo con la figura 3a, es posible calcular la absorción de IR ligada a los portadores libres en los canales. Estos resultados se representan en la figura 3b para una longitud de onda de IR de 4,5 μm .

Además se forma un electrodo para estar en contacto con todas las capas de gases de electrones. Está destinado a estar unido eléctricamente a la estructura mecánica eléctricamente conductora en la que se encastra la ventanilla.

Se integra una rejilla metálica en la ventanilla tal como se ha descrito anteriormente. Esta integración se puede realizar enterrando la rejilla en una capa semiconductor epi-estructurada o depositando la rejilla en la superficie.

Esta rejilla se comporta como un filtro paso alto en el campo de la RF. El diámetro de los hilos depositados es reducido con el fin de limitar la ocultación óptica. El tamaño de la malla de la rejilla depende de la frecuencia de corte requerida.

Teniendo en cuenta el índice de refracción de la capa de GaN ($\sim 2,3$) se filtra la proporción de rayos ópticos que se difracta en el sustrato con unos ángulos superiores a 25°, puesto que permanecen atrapados por reflexión total interna.

El motivo de la rejilla se puede registrar de manera pseudoaleatoria o aperiódica con el fin de evitar la creación de órdenes de difracción.

El diámetro del hilo de la rejilla debe ser superior a la profundidad de penetración del campo electromagnético en el metal (grosor de piel δ) que depende de la frecuencia base a la que se debe utilizar el dispositivo:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f}} \frac{1}{\sqrt{\pi \kappa \mu_0 \mu_R}}$$

siendo μ_0 la permeabilidad del vacío y μ_R la permeabilidad relativa del material.

Por ejemplo, a 1 GHz, para un hilo de oro (conductividad $\kappa=45,2 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ $\mu_R=1$), el grosor de piel δ es de 2,3 μm .

Este modo de realización combina los rendimientos de aislamiento de la RF de las rejillas para las bajas frecuencias (filtro paso alto) y los rendimientos de la capa semiconductor epi-estructurada a alta frecuencia.

Se va a describir ahora en relación con las figuras 4, un ejemplo de realización de una ventanilla 100 según este modo de realización, con una rejilla metálica enterrada en la red de heteroestructuras. En este ejemplo todas las heteroestructuras (tres) son idénticas aunque esto no sea necesario como se verá más adelante; la capa semiconductor SC1 es de n-AlGaIn, la capa semiconductor SC2 no dopada de GaN, aunque sin embargo se darán otros ejemplos de materiales.

Inicialmente se realiza a partir de un sustrato plano 10 (no necesariamente con simetría de revolución), en el que una de las caras 11 está pulida con una calidad óptica y otra 12 pulida con una calidad compatible con un crecimiento mediante epitaxia (cara denominada epi-ready). Este sustrato puede ser de zafiro eventualmente orientado c, o de silicio para unas realizaciones de 1,06 μm en banda II, de 1,55 μm en banda III, o de SiC para ir desde el visible hasta la banda III. Puede tratarse también de un sustrato huésped tal como el obtenido mediante la tecnología "Smart Cut" que consiste principalmente en relacionar sobre un sustrato huésped eventualmente de grandes dimensiones, unas heteroestructuras fabricadas aparte en las que se ha retirado el sustrato inicial.

Se puede depositar previamente una capa 20 tampón, del lado epi-ready: eventualmente una capa de GaN o AlN de algunos nanómetros de grosor (de 20 a 50 nm) y epitaxiada a baja temperatura (del orden de 450 a 600 °C) seguida

de una capa de GaN o de GaAlN de algunas micras ($\sim 2 \mu\text{m}$) epitaxiada a alta temperatura (superior a $1000 \text{ }^\circ\text{C}$).

5 Directamente sobre el sustrato 10 o sobre esta capa 20 tampón, se epitaxia un apilado de heteroestructuras 30 GaN/AlGaN de manera que formen varios canales 33 2DEG unos por encima de los otros. Preferentemente, las capas 32 SC2 de GaN no están dopadas. Las capas 31 barrera SC1 de AlGaN están dopadas n periódicamente (eventualmente con silicio). En la figura, se ha representado un apilado de capas GaN/n-AlGaN; se podría invertir y realizar un apilado de las capas n-AlGaN/GaN.

Eventualmente, los grosores de cada una de las barreras pueden ser ligeramente diferentes unos de otros con el fin de evitar la creación de una estructura de tipo espejo de Bragg.

El número de capas semiconductoras y los materiales puede variar de una heteroestructura a otra.

10 La densidad de dopado en las barreras 31 de AlGaN, su grosor, el grosor de las capas 32 de GaN así como el tamaño total de la estructura epitaxiada depende de los rendimientos requeridos en términos de resistencia eléctrica global de la capa y de transparencia óptica requerida en la banda de interés.

Se describirá ahora la etapa de realización del electrodo 40 y de la rejilla 50.

15 Sobre la capa epi-estructurada, se efectúa una apertura sobre toda la periferia de la muestra y sobre toda la profundidad de la red GaN/AlGaN, eventualmente hasta el sustrato 10. Se asegura que el grabado permita la buena toma de contacto sobre sus laterales.

20 Se efectúa un segundo grabado que vuelve a colocar el motivo de la rejilla a depositar. La profundidad y la longitud del grabado dependen del tamaño de los hilos 50 de la rejilla a depositar, y por tanto de los rendimientos de RF buscados. Como se muestra en las figuras 4a y 4b, se asegura que el motivo de la rejilla utilizado coincida con la abertura en la periferia con el fin de asegurar después de la metalización la continuidad eléctrica entre la rejilla y el electrodo.

25 Se depositan unos contactos 41 y 42 óhmicos en el fondo de las dos aberturas y posteriormente se recuecen. Eventualmente estos contactos puede ser a base de Ti/Al/Ni/Au, de Ti/Al/Mo/Au, de Ti/Al/Ir/Au, etc. Un recocido a alta temperatura (del orden de $800 \text{ }^\circ\text{C}$) permite obtener un contacto eléctrico de buena calidad. En las figuras 4a y 4b, la rejilla es bi-periódica de malla regular (mismo período según los dos ejes), pero los dos periodos pueden ser diferentes.

Se puede realizar otro depósito 42 metálico con el fin de engrosar y eventualmente ensanchar el contacto 41. Este contacto se puede realizar a base de Ti/Au seguido de una recarga electrolítica de Au. El electrodo 40 está compuesto de ese modo por un contacto 41 óhmico y de este otro depósito 42 metálico.

30 Se puede realizar otro depósito 52 metálico con el fin de engrosar y eventualmente ensanchar el contacto 51. Este contacto se puede realizar a base de Ti/Au seguido de una recarga electrolítica de Au. Ventajosamente, el grosor del metal así depositado no sobrepasa la altura de la heteroestructura con el fin de proteger eficazmente la rejilla. Los hilos 50 de la rejilla están compuestos de ese modo por un contacto 51 óhmico y por este otro depósito 52 metálico.

35 El electrodo 40 obtenido permite asegurar un contacto eléctrico con los canales 33 2DEG de GaN y de ese modo asegurar una continuidad electromagnética entre la ventanilla 100 y su soporte mecánico que actúa de referencia eléctrica. Esta metalización engrosada que permite recuperar el contacto eléctrico sobre la ventanilla puede recubrir también el soporte mecánico en el que está encastrada. De ese modo, se hace posible asegurar la continuidad eléctrica de la ventanilla poniéndola en contacto por el lateral.

40 Se pueden depositar unas capas 60 antirreflejos sobre cada una de las dos caras de la ventanilla (eventualmente únicamente sobre la cara del lado de la rejilla o únicamente sobre la cara 11 del sustrato) con el fin de reducir las reflexiones ópticas en las interfaces, en las longitudes de onda de interés y evitar la formación de cavidades Fabry-Pérot (ligadas particularmente a la interfaz GaN/zafiro). Cada una de estas 2 capas 60 puede optimizarse independientemente, siendo diferentes los índices del zafiro ($\sim 1,8$) y del AlGaN ($\sim 2,3$). Eventualmente, estas capas 60 pueden ser o bien a base de dieléctricos o de semiconductores de gran hueco (tales como el diamante, TiO_2 , MgF_2 , ZnS , u otros,...) o bien a base de materiales sub-lambda no estructurados; eventualmente se puede tratar directamente de la heteroestructura.

45 Se practica una apertura en las capas antirreflejos (lado epi-estructurado) con el fin de permitir un acceso al contacto 40 periférico engrosado.

50 Según una variante de realización, el apilado de heteroestructuras no se epitaxia sino que se relaciona sobre la cara epi-ready del sustrato.

Se pueden realizar otras variantes más:

El GaN se puede sustituir por un semiconductor III-N tal como:

- AlN (energía de banda prohibida más elevada que el GaN: $E_g=6,2$ eV o bien $\lambda_g=200$ nm) lo que permite extender la transparencia de la capa semiconductor en el UV próximo. Por extensión, todas las composiciones de $Al_xGa_{1-x}N$ que permiten situar la energía de la banda prohibida entre 6,2 eV y 3,4 eV.
- InN (energía de banda prohibida más reducida que la del GaN: $E_g=0,65$ eV o bien $\lambda_g=1,9$ μm). Lo que permite cortar el visible y el infrarrojo cercano hasta 2 μm , mejora la sensibilidad de portadores y su movilidad. Por extensión, todas las composiciones de $In_xGa_{1-x}N$ que permiten situar la energía de la banda prohibida entre 3,2 eV y 0,65 eV.
- Los materiales de la familia $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$
- los materiales de la familia $Al_xIn_yGa_{1-x-y}As_zN_{1-z}$.
- El diamante, particularmente nanocristalino o nanoestructurado.

La heteroestructura GaN/AlGaN se puede sustituir mediante un semiconductor de la familia II-VI (ZnO, MgZnO).

Se puede utilizar un semiconductor III-N (compárese con la lista de los materiales citados anteriormente) para realizar los canales 2DEG y las barreras SC1 diferentes de GaN y de AlGaN.

Se puede utilizar un semiconductor de la familia II-VI (ZnO, MgZnO) en lugar de la red GaN/AlGaN.

- 15 Se puede realizar una pantalla de Salisbury con la ayuda de un apilado de heteroestructuras tal como se ha descrito anteriormente, de un lado y otro de la ventana de zafiro. Para un efecto interferométrico a 10 GHz, el grosor de zafiro ($\epsilon_R=11,58$) puede ser de 2,2 mm (o bien $\lambda/4$) o de 6,61 mm (o bien $3\lambda/4$). La capa de GaN en la cara delantera debe presentar una reflectividad del 50 % (o bien una resistencia superficial del orden de 450 Ω /cuadrado). La cara posterior del dispositivo debe presentar una reflectividad lo más elevada posible.
- 20 Las ventajas de la ventanilla según la invención con relación al estado de la técnica antes mencionado son las siguientes:
- Compatibilidad tecnológica entre la capa conductora que da las propiedades de RF y un sustrato de interés para las aplicaciones ópticas en el visible e IR gracias a la epitaxia directa sobre el sustrato de zafiro.
 - Transparencia en la banda visible e IR (de 0,4 μm hasta 5 μm).
 - Muy reducida absorción de IR y gran reflectividad de la RF gracias a la movilidad elevada de los portadores en los canales 2DEG.
 - Reducida difracción óptica.
 - Índice óptico reducido para un semiconductor ($\sim 2,3$ a 500 nm) que limita las reflexiones ópticas a la interfaz zafiro/GaN a $\sim 1,5$ %.
 - Muy buena resistencia al flujo óptico para unas longitudes de onda inferiores a 0,4 μm (muy reducida absorción en la capa de GaN porque la energía de los fotones es inferior a la energía de la banda prohibida, y muy buena conductividad térmica del GaN). En particular para las configuraciones que no comprenden una parte metálica expuesta (o que pueda exponerse) a los flujos ópticos, tal como una rejilla.
 - Rendimientos inigualables en términos de aislamiento de la radiofrecuencia para la configuración con rejilla. En efecto, en este tipo de configuración, se asocian los rendimientos de las rejillas en baja frecuencia al poder aislante a altas frecuencias de las capas dopadas.
 - Muy gran resistencia a la erosión de la cara reflectante para las configuraciones sin rejilla o con rejilla enterrada y por lo tanto protegida porque el GaN es un material muy duro, comparable al zafiro. Esto permite la utilización de la ventana con la cara epitaxiada en la cara delantera (hacia el exterior del sistema optrónico a aislar).
 - Facilidad de integración de la rejilla en el caso de la configuración con rejilla, porque las heteroestructuras de GaN son fáciles de grabar con unos procedimientos de microelectrónica adaptados (RIE acrónimo de la expresión anglosajona "Relative Ion Etching", ICP acrónimo de la expresión anglosajona "Inductively Coupled Plasma", etc.).

Se ha realizado una ventanilla de la manera siguiente.

- El sustrato de zafiro utilizado es un sustrato circular orientado siguiendo el eje c [0001] de 150 mm de diámetro y de 8 mm de grosor. Una de las caras se pule con una calidad óptica. La otra cara se pule con una calidad epi-ready.
- Sobre la cara epi-ready, se deposita una capa tampón constituida por 20 nm de GaN a baja temperatura seguida de 2 μm de $Al_{0,27}Ga_{0,73}N$ a alta temperatura no dopado.
- Sobre esta cara tampón, se epitaxia una red de 80 heteroestructuras de GaN/Al_{0,27}Ga_{0,73}N (100/900 Å). Las capas de GaN no están dopadas y las capas de AlGaN se dopan a $2,2 \cdot 10^{18}$ cm⁻³. Estas capas de AlN no dopadas de 1 nm de grosor se utilizan en la interfaz AlGaN/GaN con el fin de limitar los efectos de la rugosidad de la interfaz en la movilidad de los electrones del gas 2D; estas capas de AlN son un ejemplo de terceras capas SC3 de las heteroestructuras. La movilidad de los portadores en los canales (y en el plano de las capas) es de 1500 cm²/V/s.
- La red de heteroestructuras se abre en 5 μm de profundidad y 5 μm de ancho con un motivo del tipo rejilla con el paso de 400 μm . En toda la periferia del sustrato, se practica una abertura de 1000 μm de largo sobre toda la profundidad epitaxiada. En estas dos aberturas, se deposita y después se recuece un contacto óhmico de Ti/Al/Mo/Au (150/600/350/500 Å) se deposita un segundo depósito de Ti/Au (150/500 Å) seguido de una recarga

electrolítica de Au para alcanzar un grosor de 5 μm de Au y una longitud de contacto de 5 mm a la altura del contacto periférico.

- 5
- Por encima de esta estructura, se deposita una capa que refleja de 275 nm de MgF_2 de manera que se optimice la transmisión a 1,5 μm . Se practica una abertura a la altura de esta capa de MgF_2 con el fin de liberar el acceso al contacto periférico.
 - En la otra cara del sustrato, se deposita un tratamiento dieléctrico multicapa.

Se han obtenido los resultados siguientes:

A 4,5 μm , la absorción ligada a los portadores libres en la superred es del 1,4 %. Las propiedades de transparencia, de absorción y de reflexión global de la estructura se han representado sobre la figura 5a.

- 10
- La resistividad superficial de la estructura obtenida es de 2,6 ohmios/cuadrado, lo que permite obtener una transmisión de RF para una capa equivalente auto-portada de -37 dB. En el sustrato de zafiro, los resultados de transmisión de RF se han representado en la figura 5b.

REIVINDICACIONES

1. Ventanilla optrónica (100) que comprende un sustrato (10) de dos caras (11, 12), con, sobre una de las caras del sustrato o sobre las dos caras, un apilado de varias heteroestructuras (30), estando compuesta cada heteroestructura de al menos dos capas (31, 32) semiconductoras SC1, SC2, estando dopada la capa (31) SC1, comprendiendo la capa (32) SC2 en sí misma una capa (33) de gas de electrones bidimensional formada en la interfaz con la capa SC1, siendo el sustrato y las capas transparentes en la banda 0,4 μm - 5 μm , **caracterizada porque** comprende un electrodo (40) en contacto con todas las capas (33) de gas de electrones, y una rejilla metálica bi-periódica enterrada en el apilado, en contacto con el electrodo (40).
2. Ventanilla optrónica (100) según la reivindicación anterior, **caracterizada porque** la rejilla es de mallas regulares.
3. Ventanilla optrónica (100) según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada porque** la rejilla tiene un hilo (50) de grosor inferior a 5 μm y un paso inferior a 500 μm .
4. Ventanilla optrónica (100) según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada porque** la capa semiconductoras (32) SC2 no está dopada.
5. Ventanilla optrónica (100) según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada porque** las heteroestructuras (30) son de grosor diferente y/o no están compuestas de los mismos materiales y/o no comprenden el mismo número de capas.
6. Ventanilla optrónica (100) según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada porque** comprende un apilado de 10 a 80 heteroestructuras (30).
7. Ventanilla optrónica (100) según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada porque** comprende una capa (20) tampón entre el sustrato (10) y el apilado de heteroestructuras (30).
8. Ventanilla optrónica (100) según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada porque** comprende una o dos capas (60) antirreflejos.
9. Ventanilla optrónica (100) según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada porque** el sustrato (10) es de zafiro o SiC o Si y **porque** la capa (32) SC2 es de GaN y la capa (31) SC1 de AlGaIn con una concentración de Al comprendida entre 25 y 30 %.
10. Ventana optrónica (200) que comprende una ventanilla (100) según una de las reivindicaciones anteriores encastrada en una estructura (210) mecánica eléctricamente conductora, estando unido el electrodo (40) de la ventanilla a esta estructura eléctricamente conductora.

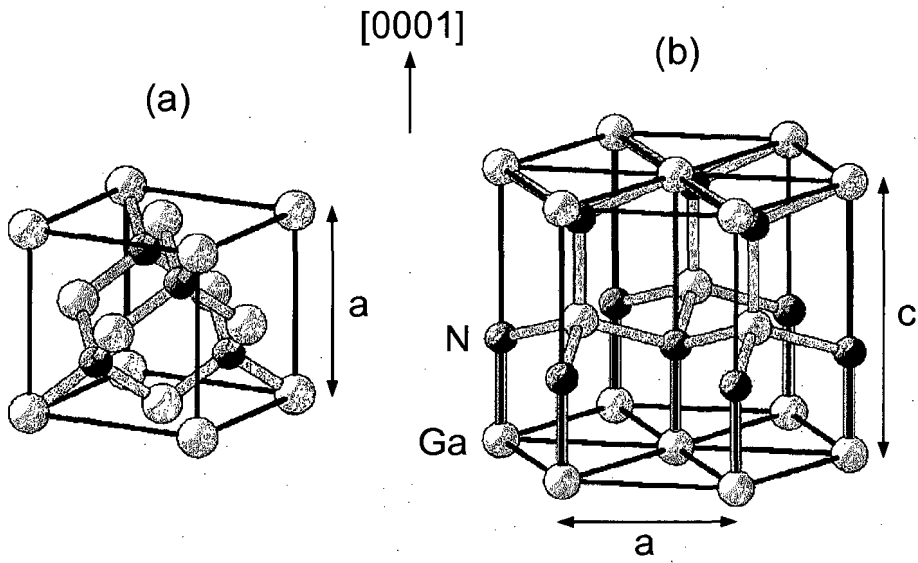


FIG.1a

FIG.1b

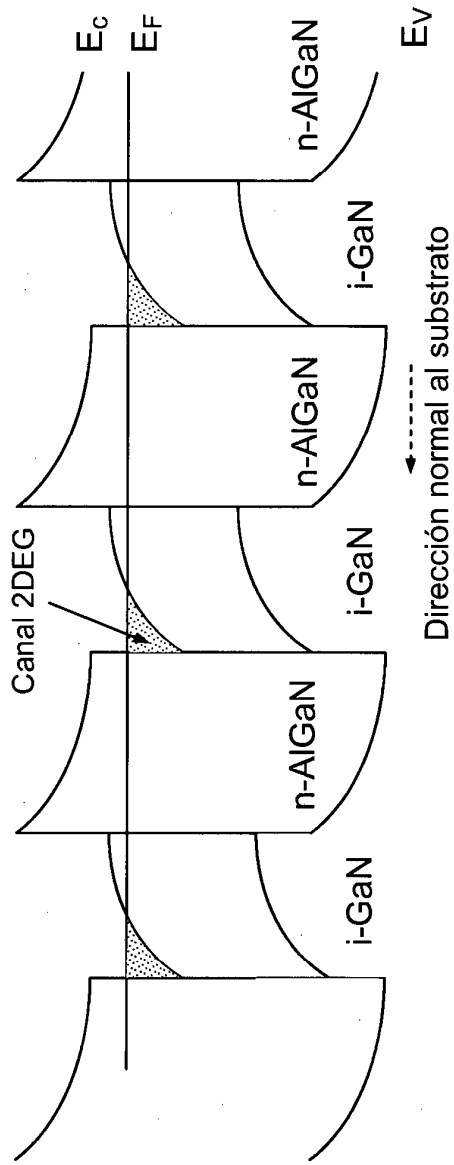


FIG.2a

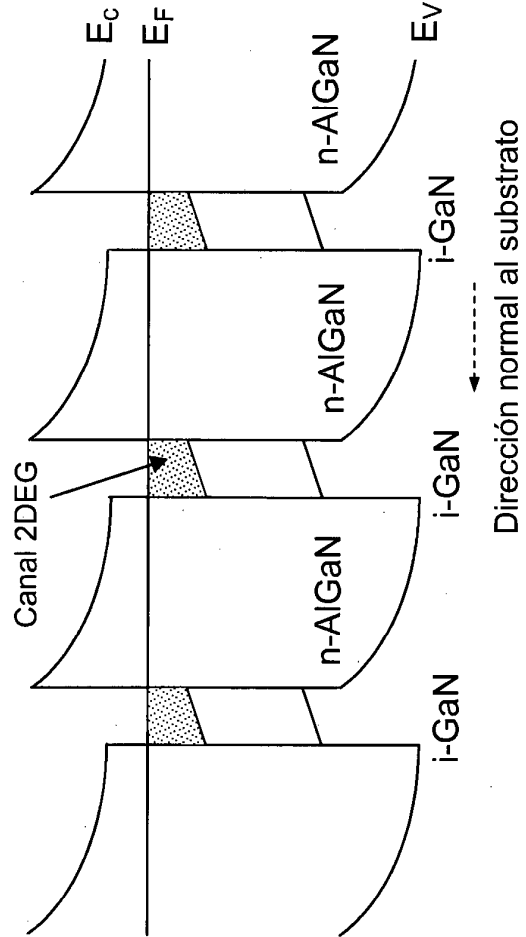


FIG.2b

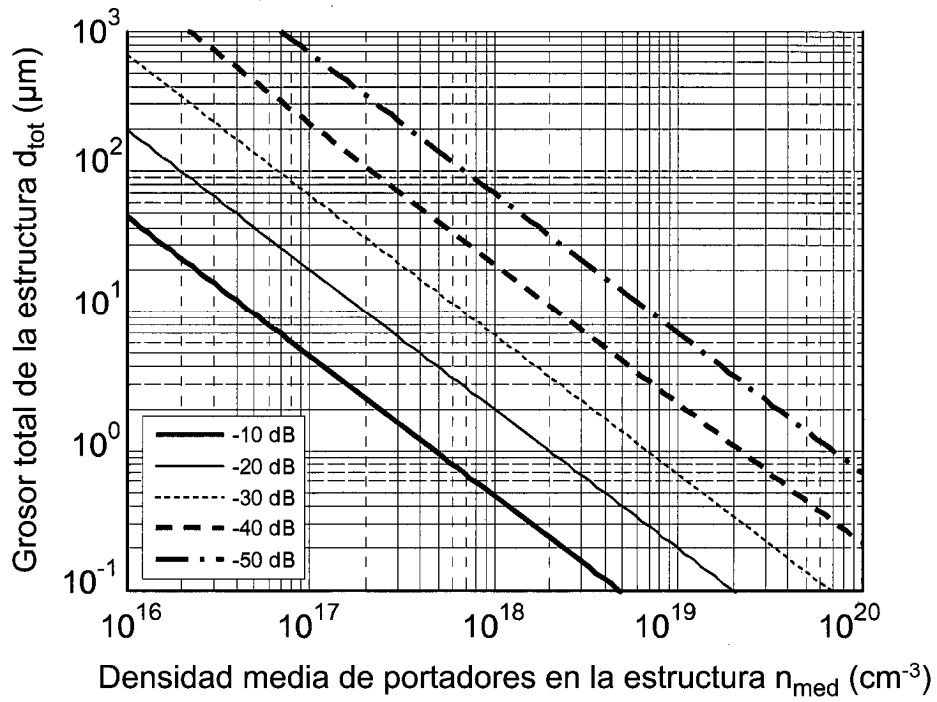


FIG.3a

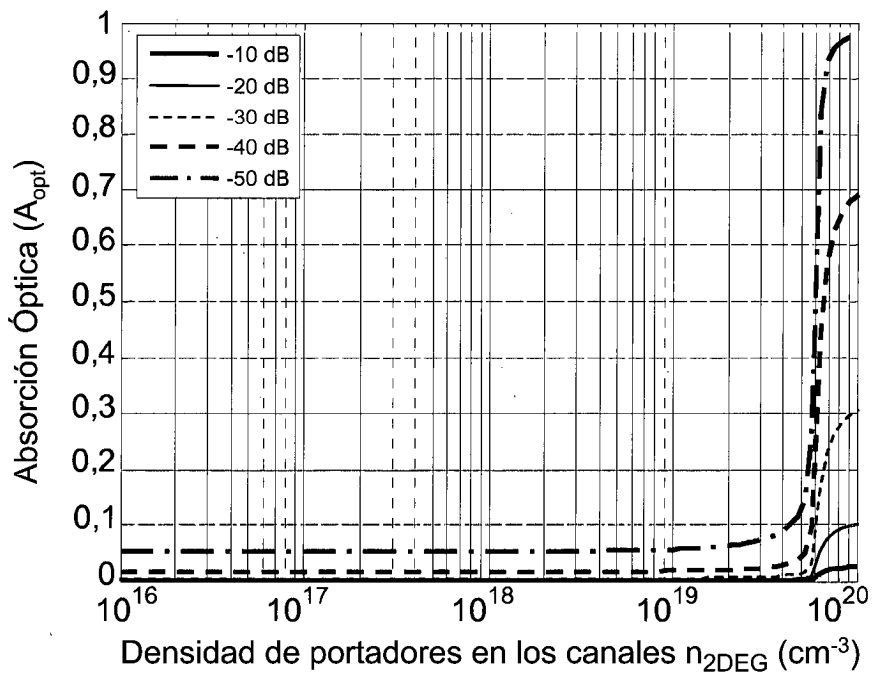


FIG.3b

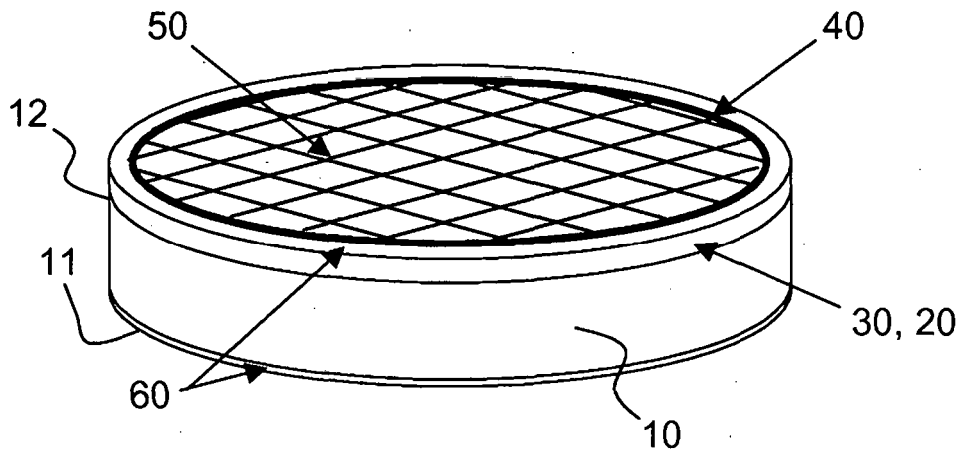


FIG. 4a

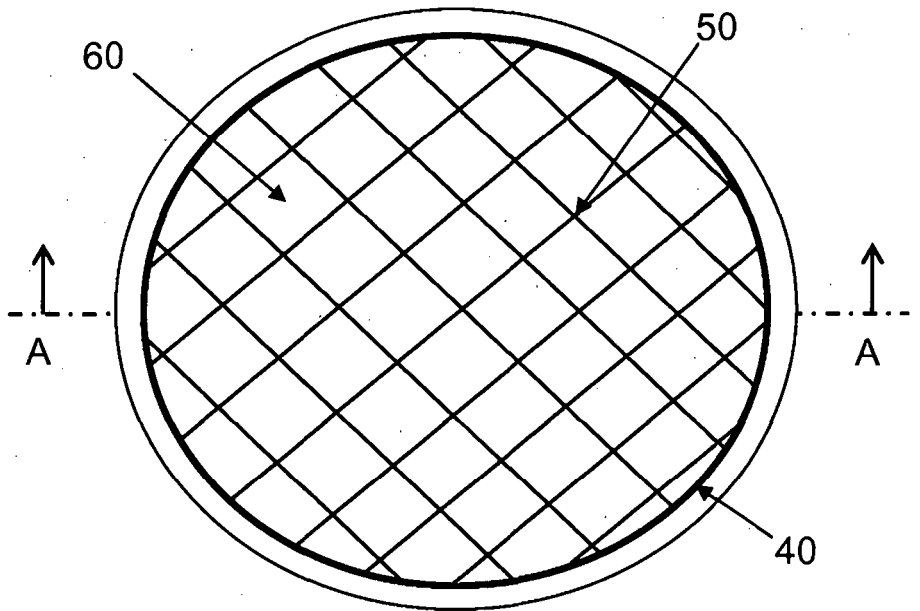


FIG. 4b

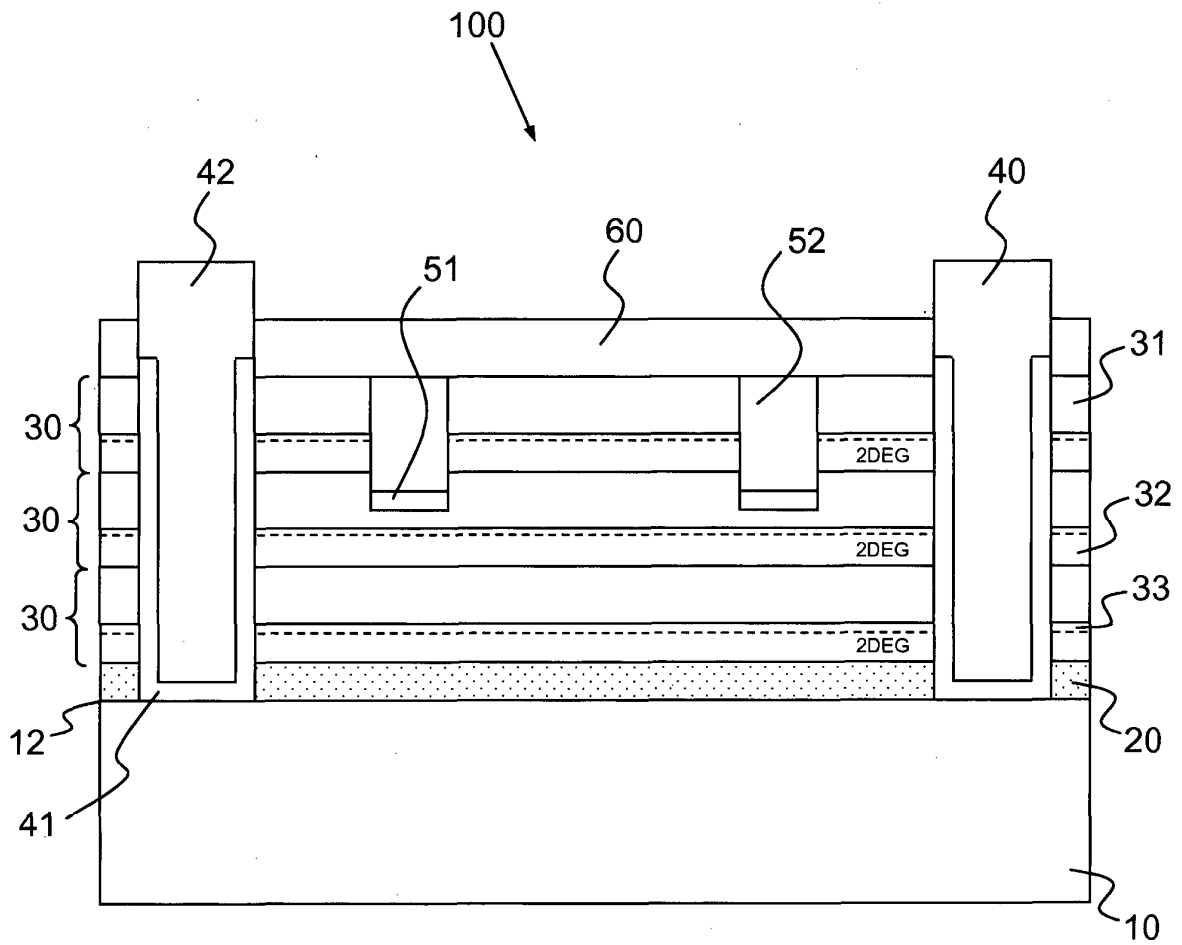


FIG.4c

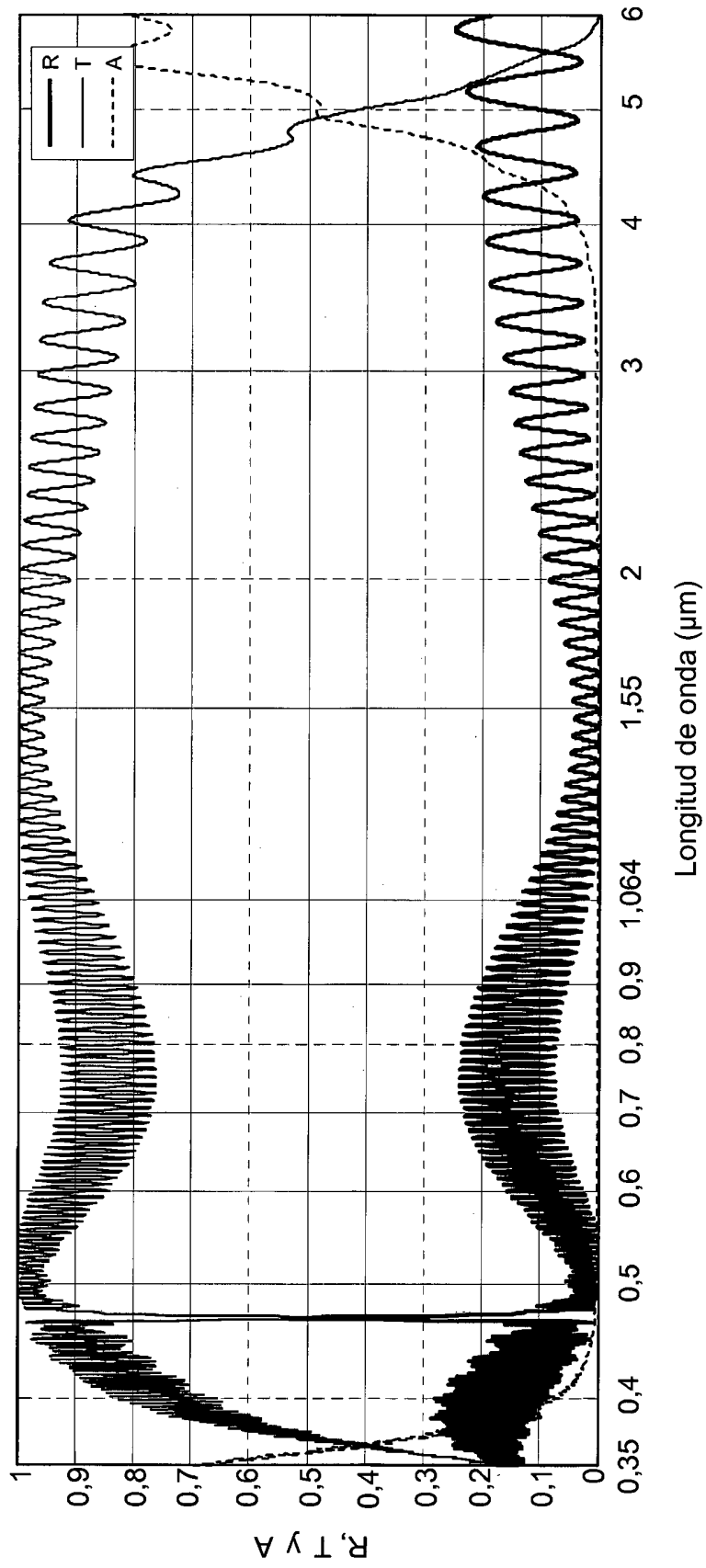


FIG.5a

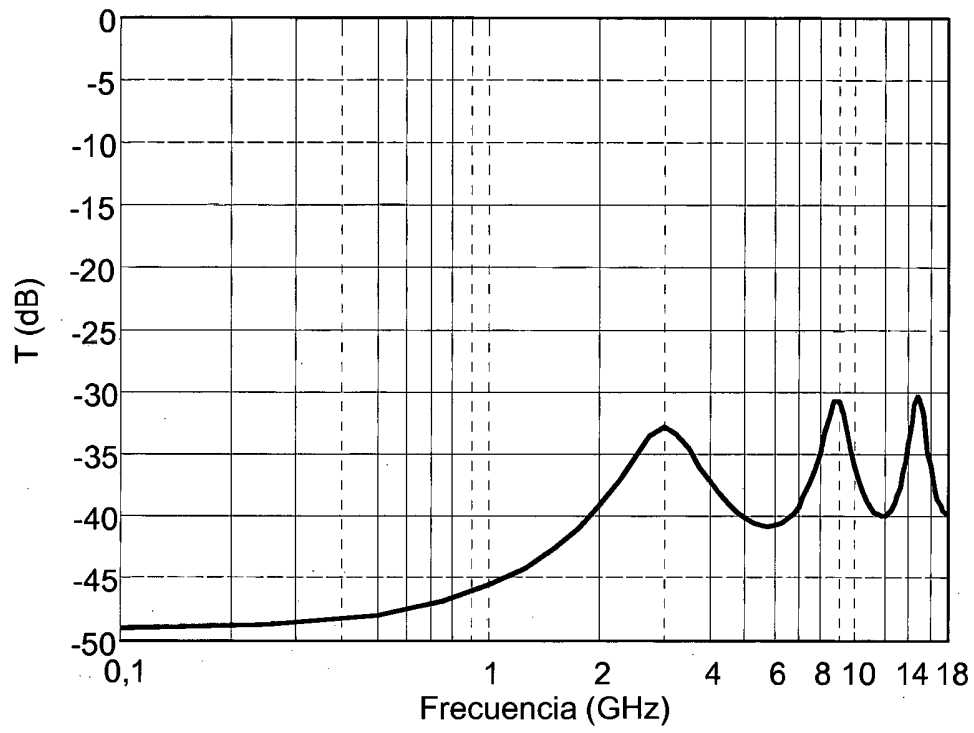


FIG.5b

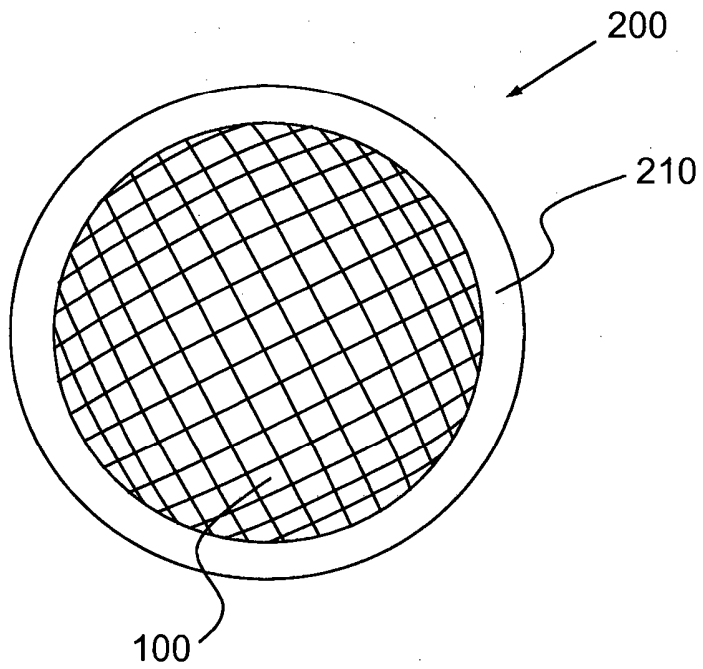


FIG.6