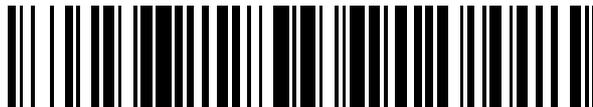


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 779 981**

51 Int. Cl.:

**H01L 31/0352** (2006.01)

**H01L 31/105** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.09.2018** E 18197749 (7)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.02.2020** EP 3471151

54 Título: **Fotodetector con resonador de Helmholtz**

30 Prioridad:

**13.10.2017 FR 1759597**

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

**21.08.2020**

73 Titular/es:

**OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE  
RECHERCHES AÉROSPATIALES (50.0%)  
Chemin de la Hunière  
91120 Palaiseau, FR y  
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE - CNRS (50.0%)**

72 Inventor/es:

**STEVELER, EMILIE;  
CHEVALIER, PAUL;  
PELOUARD, JEAN-LUC;  
PARDO, FABRICE;  
BOUCHON, PATRICK;  
HAIDAR, RIAD y  
VERDUN, MICHAËL**

74 Agente/Representante:

**VEIGA SERRANO, Mikel**

ES 2 779 981 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

Fotodetector con resonador de Helmholtz

5 **Sector de la técnica**

La presente invención se refiere a un fotodetector, un procedimiento de fabricación de dicho fotodetector, así como un sensor de imagen.

10 **Estado de la técnica**

Los fotodetectores son componentes optoelectrónicos que son fundamentales para numerosas aplicaciones, entre las cuales están la fotografía digital y las comunicaciones ópticas. Cada fotodetector tiene la función de detectar el flujo de radiación electromagnética, y convertir este flujo en una magnitud eléctrica que puede a continuación ser leída por un circuito electrónico.

Los fotodetectores más utilizados en nuestros días son fotodiodos fabricados con tecnología CMOS. Sin embargo, los fotodiodos no poseen una selectividad suficiente con respecto a la longitud de onda de la radiación electromagnética que es incidente, ya que es suficiente que esta longitud de onda corresponda a una energía de fotón que es superior a la banda prohibida del material semiconductor utilizado, para que la radiación sea detectada. Además, los fotodiodos no presentan tampoco selectividad en función del estado de polarización de la radiación electromagnética. Por estas razones, cuando se busca una detección de la radiación, que permita distinguir colores diferentes o estados diferentes de polarización, cada fotodiodo debe ser combinado con un filtro espectral o un polarizador. Estos componentes ópticos adicionales generan costes de fabricación suplementarios, así como una complejidad de montaje para disponerlos con respecto a los fotodetectores, en especial en el seno de un sensor de imagen en color.

Son también conocidos fotodetectores cuánticos que son eficaces en las ventanas espectrales 3-5  $\mu\text{m}$  (micrómetro) y 8-14  $\mu\text{m}$ , pero necesitan ser enfriados a temperaturas criogénicas, típicamente a menos de 77 K (kelvin). Esta restricción de enfriamiento constituye una limitación en su utilización, incluso un impedimento, sobre todo para aparatos que estaban destinados al gran público, y aumenta su precio de coste en una gran medida.

Son también conocidos otros tipos de fotodetectores que son eficaces en la banda espectral de 0,3  $\mu\text{m}$  a 15  $\mu\text{m}$ , tales como antenas de cuarto de onda, por ejemplo en forma de ranuras o de estructuras metal-aislante-metal. Pero las combinaciones de características que presentan, entre su nivel de sensibilidad de detección por un lado y la anchura de su intervalo espectral de detección por otro lado, no se adaptan a las aplicaciones tales como el tratamiento de imágenes.

Por otro lado, se conocen resonadores de Helmholtz de campo electromagnético. Dicho resonador comprende:

- 40 - un volumen aislante eléctricamente; y
- 45 - caras metálicas que rodean el volumen aislante a lo largo de al menos un recorrido en bucle alrededor de este volumen aislante, fuera de dos interrupciones del recorrido en bucle, de manera que las caras metálicas constituyen dos electrodos que están separados entre sí por al menos un intervalo, denominado intervalo de concentración del campo eléctrico, y que contienen las interrupciones del recorrido en bucle.

En dicho resonador de Helmholtz, el intervalo de concentración del campo eléctrico tiene un espesor entre los dos electrodos que es más pequeño que un espesor del volumen aislante, siendo medidos estos espesores según una dirección común. Por tanto, cuando la radiación electromagnética es incidente sobre el resonador, un campo eléctrico que se crea por esta radiación en el resonador es mucho más intenso en el intervalo de concentración del campo eléctrico que en el volumen aislante.

Además, el experto en la técnica sabe cómo seleccionar las dimensiones del volumen aislante y de las caras metálicas de dicho resonador, para producir una resonancia del campo eléctrico en el intervalo de concentración del campo eléctrico, a una longitud de onda deseada para la radiación electromagnética.

La publicación "*Dual band wide-angle metamaterial perfect absorber based on the combination of localized surface plasmon resonance and Helmholtz resonance*", ZHANG *et al.*, *Scientific Reports*, vol. 7, no. 1, de 18 de julio de 2017, divulga un fotodetector con resonador de Helmholtz. A partir de esta situación, un objetivo de la presente invención es disponer de nuevos fotodetectores, cada uno con un intervalo espectral de detección y una selectividad con respecto a la polarización de la radiación electromagnética a detectar que se pueden elegir a voluntad.

65

**Objeto de la invención**

Otro objetivo es disponer dichos fotodetectores que poseen un gran campo angular de detección, y/o una sección eficaz de detección importante, y/o dimensiones reducidas en especial para permitir realizar sensores de imagen de resolución fina.

Otro objetivo más es disponer dichos fotodetectores que puedan ser fabricados a un coste moderado o reducido, y que no necesiten enfriamiento para su funcionamiento.

Por ello, un primer aspecto de la invención propone un fotodetector con resonador de Helmholtz, que es eficaz para detectar al menos una radiación electromagnética que tenga una longitud de onda comprendida entre 0,3  $\mu\text{m}$  y 15  $\mu\text{m}$ . El fotodetector comprende el resonador de Helmholtz, con su volumen aislante y caras metálicas que tienen dimensiones adaptadas para producir una resonancia del campo eléctrico en el intervalo de concentración del campo eléctrico cuando la longitud de onda de la radiación varía entre 0,3  $\mu\text{m}$  y 15  $\mu\text{m}$ .

El fotodetector de la invención comprende además:

- al menos una estructura fotosensible, que es a base de al menos un material semiconductor, que es absorbente para la radiación, que está dispuesto al menos en parte en el intervalo de concentración del campo eléctrico, y que está en contacto eléctrico con cada uno de los dos electrodos; y
- dos conexiones eléctricas de salida, que están conectadas eléctricamente una a una a los dos electrodos, y adaptadas para transmitir una señal eléctrica de detección que es generada en la estructura fotosensible cuando la radiación es incidente sobre el resonador de Helmholtz.

Además, la estructura fotosensible posee un intervalo espectral de detección que contiene un intervalo espectral de la resonancia del campo eléctrico. Por analogía con el campo acústico, esta última condición se puede denominar condición de acuerdo de la estructura fotosensible con el resonador.

Por tanto, en un fotodetector conforme a la invención el resonador de Helmholtz posee una función de exaltación del campo eléctrico que es generado por la radiación electromagnética. Esta exaltación es producida en el intervalo de concentración del campo eléctrico. Por tanto, debido a que la estructura fotosensible se dispone en este intervalo de concentración del campo eléctrico, el fotodetector presenta una sensibilidad elevada, aunque puede detectar radiaciones electromagnéticas cuyas intensidades son reducidas, incluso muy reducidas.

Además, el resonador de Helmholtz posee la función de un filtro de radiación electromagnética incidente, efectivo con respecto a la longitud de onda de esta radiación. El filtro que está así constituido por el resonador de Helmholtz posee una anchura espectral de resonancia que es suficiente para numerosas aplicaciones, en especial aplicaciones de procesamiento de imagen, gracias a los valores relativamente reducidos de los factores de calidad de los resonadores de Helmholtz para radiación electromagnética.

Por otro lado, siendo el resonador de Helmholtz sensible a la radiación electromagnética incidente en el interior de un gran sector angular para la dirección de incidencia de la radiación, el fotodetector de la invención posee en sí mismo un campo angular de detección que es grande. Puede por tanto estar asociado a una lente de gran apertura digital, para focalizar la radiación sobre el fotodetector con un área de recogida de la radiación que aumenta.

Además, gracias a la utilización del resonador de Helmholtz, el fotodetector posee una sección eficaz de detección que es importante.

Finalmente, un fotodetector que es conforme a la invención puede poseer un espesor que es muy reducido, en especial inferior a la longitud de onda de la radiación detectada. Este espesor muy reducido consigue las ventajas suplementarias siguientes: un valor de corriente de oscuridad que puede ser muy bajo, un mejor control de las transiciones radiativas que son utilizadas en la estructura fotosensible, un transporte eléctrico que es dominado por el efecto de deriva, y un tiempo de tránsito de los fotoportadores que es muy corto.

En primeras configuraciones de fotodetectores con resonadores de Helmholtz que son conformes a la invención, el volumen aislante eléctricamente puede ser rectilíneo y alargado en una primera dirección, y cada intervalo de concentración del campo eléctrico puede por tanto también ser rectilíneo y alargado en la misma primera dirección. Dichos fotodetectores son selectivos con respecto a la polarización de la radiación electromagnética, y son sensibles principalmente a la radiación que está polarizada linealmente y por tanto el campo magnético es paralelo a la dirección de elongación del volumen aislante y del intervalo de concentración del campo eléctrico.

En segundas configuraciones de fotodetectores con resonadores de Helmholtz que son también conformes a la invención, el volumen aislante eléctricamente puede poseer dos ramas rectilíneas y alargadas que son perpendiculares entre sí. En este caso, cada intervalo de concentración del campo eléctrico puede comprender ventajosamente, para cada rama de volumen aislante, un segmento de intervalo que es también rectilíneo y alargado paralelamente a esta rama, y que comprende un segmento de la estructura fotosensible. Un fotodetector

que posee dicha segunda configuración es sensible simultáneamente y en la medida que son equivalentes, a todos los estados de polarización posibles para la radiación electromagnética. El fotodetector produce por tanto una señal de detección que es representativa de la intensidad de la radiación, sumada sobre todo sus estados de polarización.

5 De forma general, las caras metálicas del resonador de Helmholtz pueden formar, por un lado, una cubeta que tiene un fondo y dos caras laterales que se extienden continuamente a partir de los dos lados opuestos del fondo y formar, por otro lado, una cara de cubierta que está enfrentada al fondo. El volumen aislante está por tanto situado entre el fondo de la cubeta y la cara de cubierta, y simultáneamente entre las dos caras laterales de la cubeta. Además, cada intervalo de concentración del campo eléctrico está situado entre el borde lateral de la cara de cubierta y un borde de una de las caras laterales de la cubeta que es opuesta al fondo de la cubeta. Preferiblemente, las dos caras laterales de la cubeta pueden ser paralelas y separadas por una anchura de cubeta que está comprendida entre 0,05  $\mu\text{m}$  y 0,25  $\mu\text{m}$ . Simultáneamente, el fondo de la cubeta y la cara de cubierta pueden ser paralelas y separadas por un espesor del volumen aislante que está comprendido entre 0,03  $\mu\text{m}$  y 0,25  $\mu\text{m}$ . Por ello, la dirección de altura del volumen aislante se mide perpendicularmente a la dirección de la anchura de la cubeta.

15 También de forma general para la invención, el espesor de cada intervalo de concentración del campo eléctrico, cuando se mide de un electrodo al otro, puede estar comprendido entre 10 nm y 100 nm, y cada intervalo de concentración del campo eléctrico puede tener una anchura, medida paralelamente a al menos uno de los electrodos al nivel del intervalo de concentración del campo eléctrico considerado, que está comprendida entre 10 nm y 50 nm.

Incluso de forma general para la invención, cada electrodo puede estar constituido al menos en parte por uno de los metales siguientes: oro, plata, cobre, aluminio, o por una aleación que comprende al menos uno de estos metales.

25 En diversos modos de realización de la invención, cada estructura fotosensible puede comprender uno de entre una unión PIN, una porción de un material semiconductor, y un apilamiento de capas múltiples de pozo cuántico.

30 Posiblemente, el fotodetector puede comprender además una estructura de lente convergente que está dispuesta de forma fija con respecto al resonador de Helmholtz. Dicha estructura de lente puede focalizar la radiación sobre el resonador de Helmholtz, cuando esta radiación es incidente sobre la estructura de lente. En este caso, el fotodetector puede incluso comprender además una capa de un material transparente para la radiación, que está dispuesta entre el resonador de Helmholtz y la estructura de lente. Esta capa posee una función de espaciador entre el resonador de Helmholtz y la estructura de lente. Por tanto, el resonador de Helmholtz, cada estructura fotosensible, la capa del material transparente y la estructura de lente pueden ser solidarias en el seno de un bloque rígido. La manipulación del fotodetector y su montaje en un aparato se facilitan por tanto. En particular, la estructura de lente puede comprender una capa metálica que está provista de un agujero enfrentado con el resonador de Helmholtz, y provista además de ranuras que están dispuestas alrededor del agujero para constituir una lente de Huygens.

40 Un segundo aspecto de la invención propone un procedimiento de fabricación de un fotodetector, cuando este fotodetector es conforme al primer aspecto de la invención. El procedimiento comprende las etapas siguientes:

45 /1/ en un soporte temporal, formación de cada estructura fotosensible y de una porción de material aislante eléctricamente como volumen aislante, y después formación de un primero de los electrodos por encima de la estructura fotosensible y el volumen aislante;

/2/ adhesión de un soporte definitivo sobre el primer electrodo, de un lado del mismo que es opuesto al soporte temporal;

50 /3/ retirada del soporte temporal; y

/4/ depósito de un segundo de los electrodos sobre la estructura fotosensible y la porción de material aislante, de un lado del mismo que es opuesto al soporte definitivo.

55 Finalmente, un tercer aspecto de la invención propone un sensor de imagen que comprende:

- una matriz de fotodetectores conformes, cada uno, al primer aspecto de la invención, estando dispuestos estos fotodetectores en cruzamientos de líneas y de columnas de la matriz;

60 - un sistema de direccionamiento, adaptado para seleccionar cada fotodetector individualmente; y

- un sistema de lectura, adaptado para leer la señal eléctrica de detección que es transmitida por las dos conexiones eléctricas de salida de uno cualquiera de los fotodetectores cuando este fotodetector es seleccionado por el sistema de direccionamiento.

65

Dicho sensor de imagen puede tener un paso de líneas o de columnas que está comprendido entre 2  $\mu\text{m}$  y 20  $\mu\text{m}$  cuando cada fotodetector es eficaz para detectar una radiación cuya longitud de onda está comprendida entre 0,8  $\mu\text{m}$  y 15  $\mu\text{m}$ , correspondiente al campo infrarrojo óptico.

- 5 De forma alternativa, el paso de líneas o de columnas puede estar comprendido entre 0,1  $\mu\text{m}$  y 2  $\mu\text{m}$  cuando cada fotodetector es eficaz para detectar una radiación cuya longitud de onda está comprendida entre 0,3  $\mu\text{m}$  y 0,8  $\mu\text{m}$ , correspondiente al campo de la luz visible.

**Descripción de las figuras**

10 Otras particularidades y ventajas de la presente invención aparecerán en la descripción a continuación de ejemplos de realización no limitativos, con referencia a los dibujos adjuntos, en los cuales:

- 15 - la figura 1 es una vista en sección transversal de un fotodetector conforme a la invención;
- las figuras 2a y 2b son vistas en perspectiva de dos fotodetectores conforme a la invención, según dos configuraciones diferentes;
- 20 - la figura 3a ilustra un primer modo de realización para una estructura fotosensible de un fotodetector conforme a la invención, y la figura 3b es un diagrama espectral de reflexividad para el fotodetector de la figura 3a;
- la figura 4 corresponde a la figura 3b para un segundo modo de realización de la estructura fotosensible;
- 25 - las figuras 5a y 5b corresponden, respectivamente, a las figuras 3a y 3b para un tercer modo de realización de la estructura fotosensible;
- las figuras 6a a 6h son vistas en sección de un conjunto de fotodetectores conformes a la invención, en el trascurso de elaboración, que ilustran las etapas del procedimiento de fabricación de estos fotodetectores;
- 30 - la figura 7 es una vista en sección transversal de un fotodetector conforme a la invención, que está provisto de una estructura de lente; y
- la figura 8 es una vista en perspectiva de un sensor de imagen conforme a la invención.

**Descripción detallada de la invención**

Por razón de claridad, las dimensiones de los elementos que se representan en estas figuras no corresponden ni a dimensiones reales ni a relaciones de dimensiones reales. Además, las referencias idénticas que son idénticas en las figuras diferentes designan elementos idénticos o que tienen funciones idénticas.

40 De acuerdo con las figuras 1, 2a y 2b, un fotodetector 10 conforme a la invención comprende una capa 2 base que posee una superficie S plana, un volumen 1 aislante eléctricamente, una porción 3 de cubierta y una estructura 4 intermedia. La capa 2 base es de material metálico, con preferencia con una conductividad eléctrica que es elevada. Por ejemplo, la capa 2 base puede ser de oro (Au) o de cobre (Cu). El volumen 1 aislante puede estar constituido por una porción de un material aislante eléctricamente, tal como sílice ( $\text{SiO}_2$ ), que está incrustado en la capa 2 base para una parte principal de esta porción. La porción 3 de cubierta es también de material metálico, con preferencia incluso con una conductividad eléctrica que es elevada, y por tanto posiblemente también de oro. Por tanto, la capa 2 base presenta una forma de cubeta paralelepípedica a partir de su superficie S, con caras 11 y 12 laterales opuestas, un fondo 13 de cubeta y una cara 14 inferior de la porción 3 de cubierta, estando girada esta cara 14 inferior hacia el interior de la cubeta.

La estructura 4 intermedia será descrita en detalle más tarde. La misma está situada entre la superficie S de la capa 2 base y la cara 14 inferior de la porción 3 de cubierta alrededor del volumen 1 aislante. La misma está en contacto eléctrico, por un lado, con la capa 2 base y, por otro lado, con la porción 3 de cubierta. La capa 2 base y la porción 3 de cubierta están aisladas eléctricamente entre sí fuera de la estructura 4 intermedia. Salvo indicación contraria, se podrá suponer a continuación que la estructura 4 intermedia está contenida alrededor del volumen 1 aislante. Sin embargo, puede estar limitada a uno o varios segmentos de la periferia del volumen 1 aislante, siempre que la capa 2 base y la porción 3 de cubierta estén aisladas eléctricamente entre sí fuera de la estructura 4 intermedia.

60 La porción de material aislante llena la cubeta que está formada en la capa 2 base, con la estructura 4 intermedia que forma un espaciador periférico entre la superficie S y la porción 3 de cubierta. Las notaciones que son idénticas en la figura 1 tienen los significados siguientes:

$w_b$  anchura del volumen 1 aislante, medida entre las caras 11 y 12 laterales paralelamente a la dirección D2

65

$h_b$  espesor del volumen 1 aislante, medido entre el fondo 13 de la cubeta y la cara 14 inferior de la porción 3 de cubierta, paralelamente a la dirección D3

$w_f$  espesor de la estructura 4 intermedia, medido paralelamente a la dirección D3

$h_f$  anchura de la estructura 4 intermedia, medida paralelamente a la dirección D2

El bucle B que es indicado en la figura 1 rodea al volumen 1 aislante, y está constituido en la capa 2 base y en la porción 3 de cubierta, y atraviesa la estructura 4 intermedia en dos lugares que están situados entre la capa 2 base y la porción 3 de cubierta. La longitud de cada segmento del bucle B que está contenido en la estructura 4 intermedia es sensiblemente igual al espesor  $w_f$ . Además, este espesor  $w_f$  de la estructura 4 intermedia es inferior, con preferencia muy inferior, al espesor  $h_b$  del volumen 1 aislante. En estas condiciones, la parte de la superficie S de la capa 2 base que está enfrentada al borde periférico de la porción 3 de cubierta, forma con este borde de cubierta dos armaduras de un condensador eléctrico. El espacio que es intermedio entre estas dos armaduras de condensador es señalado como ZC. Se reparte entre los dos lados del volumen 1 aislante y constituye un intervalo de concentración del campo eléctrico, con respecto a una intensidad del campo eléctrico que puede existir en el interior del volumen 1 aislante. Este efecto de concentración del campo eléctrico ha sido denominado exaltación en la parte general de la presente descripción. El mismo es cuantificado por un factor G de exaltación, que es igual al cuadrado del cociente de la intensidad del campo eléctrico en el intervalo ZC de concentración, con respecto a la intensidad del campo eléctrico en el volumen 1 aislante. Un valor aproximado de este factor de exaltación es por tanto dado por la fórmula siguiente:  $G = \lambda^2 / (\epsilon_{sc} \cdot w_f \cdot h_f)$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la radiación R electromagnética, y  $\epsilon_{sc}$  es la permisividad dieléctrica relativa con respecto al vacío del material que constituye la estructura 4 intermedia.

Dicha estructura constituye un resonador de Helmholtz, para el cual la intensidad del campo eléctrico en el intervalo ZC de concentración presenta una resonancia en función de la longitud de onda de la radiación R electromagnética que es incidente sobre el conjunto de esta estructura. La longitud de onda central de la resonancia es dada por la fórmula conocida por el experto en la técnica:  $\lambda r = 2 \cdot \pi \cdot [\epsilon_{sc} \cdot w_b \cdot h_b \cdot h_f / (2 \cdot w_f)]^{1/2}$ . Para las fórmulas de G y  $\lambda r$  que se acaban de dar, la longitud del volumen 1 aislante y de la estructura 4 intermedia, perpendicularmente al plano de la figura 1, es decir paralelamente a la dirección D1, se supone que es mucho más grande que las dimensiones  $w_b$ ,  $h_b$ ,  $w_f$  y  $h_f$ . Dicho de otra manera, el volumen 1 aislante y la estructura 4 intermedia son alargadas paralelamente a la dirección D1, denominada dirección de elongación.

Por ejemplo, cuando la capa 2 base y la porción 3 de cubierta son de oro (Au), el volumen 1 aislante de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), y el índice de refracción medio de la estructura 4 intermedia es del orden de 3,5, se pueden utilizar las siguientes dimensiones para el resonador de Helmholtz:  $w_b = 0,11 \mu\text{m}$  (micrómetro),  $h_b = 0,10 \mu\text{m}$ ,  $w_f = 15 \text{ nm}$  (nanómetro) y  $h_f = 30 \text{ nm}$ . En estas condiciones, y cuando la radiación R electromagnética posee una polarización lineal tal que su campo magnético es paralelo a la dirección D1 de elongación, la longitud  $\lambda r$  de onda de resonancia es aproximadamente igual a  $3,25 \mu\text{m}$ , el factor G de exaltación para esta longitud de onda es superior a 100, mientras que el factor Q de calidad del resonador de Helmholtz sólo es del orden de 10. Este valor reducido del factor Q de calidad del resonador de Helmholtz permite al fotodetector 10 tener una anchura espectral de detección que es suficiente para numerosas aplicaciones, en especial aplicaciones de procesamiento de imagen. Además, estos valores numéricos de  $\lambda r$ , G y Q son poco modificados para inclinaciones de la dirección de incidencia de la radiación R que varían entre  $0^\circ$  (grado) y  $40^\circ$ , con respecto a la dirección D3 que es perpendicular a la superficie S. Por esta razón, el fotodetector 10 puede ser combinado eficazmente con una lente de focalización que posee un valor elevado de apertura digital. Por tanto, la dirección de la radiación R electromagnética es efectiva en un área de recogida de esta radiación que aumenta.

Como se indicó más arriba, la eficacia del resonador de Helmholtz para exaltar el campo eléctrico de la radiación R en el intervalo ZC de concentración es superior cuando esta radiación posee una polarización lineal tal que su campo magnético sea paralelo a la dirección de elongación del volumen 1 aislante. Por tanto, el fotodetector 10 de la figura 2a posee una sensibilidad superior para la radiación R cuando esta radiación posee una polarización lineal tal que su campo magnético sea paralelo a la dirección D1.

En el fotodetector 10 de la figura 2b, el volumen 1 aislante posee dos ramas B1 y B2, que son rectilíneas, alargadas, perpendiculares entre sí, y paralelas a las direcciones D1 y D2, respectivamente. La rama B1 posee, por tanto, una capacidad superior para exaltar el campo eléctrico de la radiación R electromagnética cuando esta radiación posee una polarización lineal tal que su campo magnético sea paralelo a la dirección D1. Simultáneamente, la rama B2 posee una capacidad superior para exaltar el campo eléctrico de la radiación R electromagnética cuando esta radiación posee una polarización lineal tal que su campo magnético sea paralelo a la dirección D2. Por combinación, dicho fotodetector 10 permite exaltar la radiación R sea cual sea su polarización, y está, por tanto, particularmente adaptado para detectar la radiación que presenta una polarización natural. Con preferencia, el intervalo ZC de concentración del campo eléctrico se extiende a lo largo de al menos una parte de cada brazo B1, B2, que comprende por tanto al menos dos segmentos de intervalo que son rectilíneos y alargados paralelamente a las direcciones D1 y D2, respectivamente.

Según la invención, la estructura 4 intermedia que está situada al menos en parte en el intervalo ZC de concentración del campo eléctrico, es fotosensible y en contacto eléctrico por un lado con la capa 2 base, y por otro lado con la porción 3 de cubierta. Las notaciones C1 y C2 en las figuras 2a y 2b designan dos contactos eléctricos de salida, que conducen a la capa 2 base para C1, y a la porción 3 de cubierta para C2. Estos contactos C1 y C2 eléctricos de salida están destinados a transmitir, por ejemplo a un circuito de lectura, una corriente o una tensión eléctrica que se produce por la radiación R en la estructura 4 fotosensible. En la parte general de la descripción, la capa 2 base y la porción 3 de cubierta han sido denominadas electrodos, en referencia con la disposición sobre las mismas de los contactos C1 y C2 eléctricos de salida.

Gracias al efecto de exaltación del campo eléctrico de la radiación R en el intervalo ZC de concentración, es posible utilizar para la estructura 4 fotosensible modos de realización que pueden tener una eficacia de detección más reducida, pero que tienen dimensiones más reducidas y/o que son más simples y menos costosas de fabricar.

En primeros modos de realización posibles, y para los fotodetectores 10 que son conformes a la invención, la estructura 4 fotosensible puede ser una unión PiN, el acrónimo PiN que significa de tres zonas, dopada positivamente para una, negativamente para otra, y con una zona intermedia de conductividad eléctrica intrínseca. Como se representa en la figura 3a, dicha unión PiN puede estar constituida por un apilamiento, según la dirección D3, de tres capas de una aleación de indio (In) de galio (Ga) y de arsénico (As), por ejemplo según la estequiometría aproximativa  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ . Para reducir una componente de difusión de la corriente de oscuridad, puede ser ventajoso añadir dos capas de un material que presenten un valor de separación energética superior al de la aleación utilizada para la unión PiN, por ejemplo dos capas de aleación de indio (In) y de fósforo (P). De hecho, los valores de separación energética respectivos de las aleaciones  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  e InP son de 0,74 eV (electrón-voltio) y de 1,27 eV. La estructura 4 fotosensible posee por tanto la configuración que es representada en la figura 3a, donde (P) designa capas que están dopadas positivamente, y (N) designa capas que están dopadas negativamente. La figura 3a indica también espesores, expresados en nanómetros (nm) y medidos según la dirección D3, que son posibles para cada capa de la estructura 4 fotosensible, correspondiente a un espesor total de aproximadamente 80 nm, igual al espesor  $w_r$  definido más arriba.

Las dimensiones del resonador de Helmholtz son seleccionadas para que este resonador este armonizado con la estructura 4 fotosensible: la energía del fotón que corresponde a la longitud  $\lambda_r$  de onda de resonancia es superior a la longitud de la separación energética de la aleación utilizada para la unión PiN, a la que se añade  $k_B \cdot T/2$ , donde  $k_B$  designa la constante de Boltzmann y T la temperatura de funcionamiento del fotodetector 10, por ejemplo igual a 300 K (kelvin) para una utilización a temperatura ambiente. En estas condiciones, la longitud de onda que corresponde al máximo de sensibilidad del fotodetector 10 así obtenido, es aproximadamente igual a 1,650  $\mu\text{m}$ , y el factor G de exaltación es aproximadamente 140 para esta longitud de onda, cuando el campo magnético de la radiación R es paralelo a la dirección de elongación del resonador de Helmholtz. Por esto, las dimensiones del resonador de Helmholtz pueden ser las siguientes:  $w_b = 0,080 \mu\text{m}$ ,  $h_b = 0,075 \mu\text{m}$ ,  $w_r = 80 \text{ nm}$  y  $h_r = 25 \text{ nm}$ . Un paso p de desfase entre varios fotodetectores 10 que son conformes a estas dimensiones y a la figura 2a o 2b, y que están yuxtapuestos en la superficie S están desfasados según las direcciones D1 o D2, puede ser de 1,1  $\mu\text{m}$ . La figura 3b reproduce un diagrama de reflexividad del conjunto de fotodetectores que es por tanto obtenido, para la radiación R en incidencia normal. El eje horizontal indica los valores de longitud A de onda, expresados en micrómetros, y el eje vertical indica los valores de la reflexividad, señalada como *Reflect* y expresada en porcentaje. La resonancia de absorción, que permite la detección de la radiación R, corresponde al valor de 1,65  $\mu\text{m}$  para la longitud de onda.

Con respecto a otros fotodetectores conocidos antes de la presente invención, el rendimiento de detección individual de cada fotodetector puede ser más reducido para la presente invención. Pero las dimensiones de cada fotodetector paralelamente a la superficie S, que son también más reducidas para la invención, permiten obtener valores para un rendimiento de detección por unidad de superficie, que son superiores a las obtenidas con los fotodetectores anteriores.

Para reducir las pérdidas de rendimiento que serían debidas a corrientes eléctricas parásitas, se producen en la proximidad de los límites laterales de la estructura 4 fotosensible, los cuales pueden ser continuos entre el volumen 1 aislante y la porción 3 de cobertura, y/o sobrepasar lateralmente más allá de los bordes laterales de la porción 3 de cobertura.

En segundos modos de realización, también posibles para los fotodetectores 10 que son conformes a la invención, la estructura 4 fotosensible puede ser una porción de un material semiconductor. Esta porción está en contacto por un lado con la capa 2 base y por el otro lado con la porción 3 de cubierta, formando por tanto un apilamiento metal-semiconductor-metal. En dicho apilamiento, la porción de material semiconductor tiene la función de absorber la energía del campo eléctrico exaltado, y las dos interfaces metal-semiconductor constituyen dos diodos D Schottky. El material semiconductor de dicha estructura 4 fotosensible puede incluso ser una aleación del tipo InGaAs, y las dimensiones siguientes conducen incluso a un valor de 1,650  $\mu\text{m}$  para la longitud  $\lambda_r$  de onda de resonancia del resonador de Helmholtz:  $w_b = 0,060 \mu\text{m}$ ,  $h_b = 0,050 \mu\text{m}$ ,  $w_r = 30 \text{ nm}$  y  $h_r = 20 \text{ nm}$ . El factor G de exaltación es por tanto aproximadamente igual a 350 en la longitud de onda de resonancia de 1,650 nm. Este valor del factor G es

superior al del primer modo de realización indicado anteriormente, debido al valor más reducido del espesor  $w_f$  de la estructura 4 intermedia. El valor de  $1,1 \mu\text{m}$  puede incluso adoptarse para el paso  $p$  de desfase de los fotodetectores múltiples que están yuxtapuestos en la superficie S. La figura 4 muestra el espectro de reflexividad que se obtiene en estas condiciones.

Dichos segundos modos de realización pueden producir valores de eficacia de detección que son inferiores a los de los primeros modos de realización descritos anteriormente, individualmente para cada fotodetector 10. Pero estos valores individuales de eficacia de detección que son inferiores pueden ser compensados por una densidad superior de fotodetectores en la superficie S, correspondiente a valores más pequeños para el paso  $p$  de desfase.

Posiblemente, los fotodetectores 10 que son conformes a dichos segundos modos de realización pueden utilizarse para detectar la radiación electromagnética según un mecanismo no lineal de absorción de dos fotones degenerados, es decir de dos fotones de longitudes de onda idénticas. En este caso, la energía de cada uno de los dos fotones está comprendida entre la anchura de la separación energética del material semiconductor de la estructura 4 fotosensible y la mitad de esta anchura de la separación energética. Por ejemplo, una energía de fotones que es igual a  $0,41 \text{ eV}$ , correspondiente a una longitud de onda de  $3 \mu\text{m}$ , permite una detección por absorción de dos fotones cuando se utiliza una aleación de semiconductor InGaAs, ya que la anchura de la separación energética es de aproximadamente  $0,74 \text{ eV}$ . El resonador de Helmholtz debe por tanto ser dimensionado para producir la resonancia a la longitud de onda de los fotones, es decir  $3 \mu\text{m}$  en el ejemplo considerado. Para las dimensiones siguientes  $w_b = 0,150 \mu\text{m}$ ,  $h_b = 0,135 \mu\text{m}$ ,  $w_f = 30 \text{ nm}$  y  $h_f = 20 \text{ nm}$ , el factor G de exaltación es aproximadamente igual a 1950 para la longitud de onda de  $3 \mu\text{m}$ . Se puede utilizar por tanto un paso  $p$  de desfase de  $2,0 \mu\text{m}$  entre dichos fotodetectores 10 que están yuxtapuestos sobre la superficie S. Dado que el cuadrado del factor G de exaltación interviene en el rendimiento de detección de la radiación R por el mecanismo de absorción de dos fotones degenerados, los fotodetectores 10 que son conformes a los segundos modos de realización de la invención y que son utilizados según este mecanismo de absorción de dos fotones degenerados, pueden adaptarse particularmente para detectar radiaciones de valores más grandes de longitud de onda.

En terceros modos de realización, incluso posibles para fotodetector es 10 que son conformes a la invención, la estructura 4 fotosensible puede ser una estructura de un pozo cuántico, conocida bajo el acrónimo QWIP para "*quantum well infrared photodetector*" en inglés. El principio de funcionamiento de dicha estructura de pozo cuántico para detectar una radiación electromagnética se supone bien conocido, por tanto no es necesario repetirlo aquí. Si fuese necesario, el lector podrá referirse a la literatura científica correspondiente, abundante y ampliamente disponible. Se indica simplemente que para dichos terceros modos de realización, se debe aplicar una tensión eléctrica de polarización entre los contactos C1 y C2 eléctricos de salida. La figura 5a representa un ejemplo de dicha estructura fotosensible. La capa de aleación indio-fósforo de  $10 \text{ nm}$  de espesor constituye el cátodo, la capa intermedia de aleación indio-galio-fósforo de  $6 \text{ nm}$  de espesor constituye el pozo cuántico, y la otra capa de aleación indio-fósforo de  $30 \text{ nm}$  de espesor constituye el ánodo de la estructura QWIP. En estas condiciones, la estructura 4 fotosensible es eficaz para detectar la radiación electromagnética cuya longitud de onda es aproximadamente igual a  $9 \mu\text{m}$ . Las dimensiones siguientes pueden ser utilizadas para armonizar el resonador de Helmholtz a este valor de longitud de onda de detección:  $w_b = 0,500 \mu\text{m}$ ,  $h_b = 0,620 \mu\text{m}$ ,  $w_f = 46 \text{ nm}$  y  $h_f = 20 \text{ nm}$ . El paso  $p$  de desfase entre dichos fotodetectores que están yuxtapuestos en la superficie S puede ser  $6,0 \mu\text{m}$ . En estas condiciones, el factor G de exaltación es aproximadamente igual a 3710 en el pozo cuántico, para la longitud de onda de  $9 \mu\text{m}$ , y un rendimiento de absorción de fotones de la radiación R en el volumen de estos pozos es de aproximadamente un 60%. Este valor de rendimiento de absorción es inferior a otros productos para estructuras de pozos cuánticos múltiples, tales como los referidos en la literatura correspondiente, pero la superficie reducida de la estructura 4 fotosensible de QWIP tal como se describió anteriormente permite reducir la corriente de oscuridad en una medida muy importante. Además, dichos terceros modos de realización permiten obtener densidades importantes de fotodetectores en la superficie S, gracias a las dimensiones de cada fotodetector que son incluso más pequeños. La figura 5b muestra la resonancia de absorción de una superficie que contiene fotodetectores yuxtapuestos, conforme a los terceros modos de realización y con los valores dimensionales que se acaban de citar.

Posiblemente, los fotodetectores 10 que son conformes a dichos terceros modos de realización pueden ser utilizados para detectar la radiación electromagnética según un mecanismo no lineal de absorción de varios fotones degenerados. De esta forma, es posible detectar radiaciones que tienen longitudes de onda más grandes, en especial en el interior de la banda espectral  $8\text{-}12 \mu\text{m}$ , y obtener valores de corriente de oscuridad que son incluso más reducidos.

Con referencia a las figuras 6a-6h, se describe ahora un procedimiento de fabricación posible para los fotodetectores 10 yuxtapuestos que son conformes a la invención.

En una primera etapa que se ilustra por la figura 6a, la estructura 4 fotosensible es realizada sobre la superficie de un soporte 21 temporal, por ejemplo una oblea de silicio monocristalino, de manera que se recubre continuamente el soporte 21 temporal. La estructura 4 fotosensible se puede realizar depositando un solo o varios materiales, en capas sucesivas superpuestas si es necesario, según el modo de realización de esta estructura, y en especial entre

los tres modos de realización que han sido descritos anteriormente. Posiblemente se pueden utilizar procedimientos de depósito por epitaxia.

5 Las porciones 2a metálicas de separación, por ejemplo de oro, se pueden realizar a continuación por encima de la estructura 4 fotosensible (figura 6b), por ejemplo utilizando un procedimiento de litografía electrónica, seguido de un depósito de oro y de una etapa de *lift-off*. Las porciones 2a de separación están destinadas a constituir las porciones de la capa 2 base que se interponen entre dos resonadores de Helmholtz de fotodetectores 10 que son vecinos en la superficie S.

10 La estructura 4 fotosensible es por tanto retirada selectivamente entre las porciones 2a de separación (figura 6c), utilizando un procedimiento de grabado que está adaptado al (a los) material(es) de la estructura 4. Dicho procedimiento puede en especial ser en fase húmeda, implementando una solución de agentes de grabado apropiados. Sin embargo, esta etapa de retirada de la estructura 4 fotosensible entre las porciones 2a de separación se puede omitir para conservar la estructura 4 fotosensible con una extensión continua bajo las porciones 3 de cubierta.

15 Los volúmenes por tanto liberados, entre apilamientos vecinos que están constituidos, cada uno, por una porción residual de estructura 4 fotosensible y una porción 2a de separación, pueden ser llenados por una resina aislante (figura 6d). Esta resina constituye el material de los volúmenes 1 aislantes.

20 Un depósito complementario de metal, en especial de oro, se efectúa a continuación (figura 6e) para formar una capa 2b complementaria que recubre continuamente las porciones 2a de separación y los volúmenes 1 aislantes. Las porciones 2a de separación y la capa 2b complementaria forman la capa 2 base que ha sido introducida más arriba en la presente descripción para cada fotodetector 10, también denominado primer electrodo.

25 Un soporte 20 definitivo, por ejemplo de carburo de silicio, de material aislante, o que comprende conexiones eléctricas realizadas anteriormente, luego se pega por encima de la capa 2b complementaria. El soporte 21 temporal se elimina a continuación, por ejemplo por pulido y después por grabado en fase húmeda. Después de volver, se obtiene la configuración de la figura 6f. Cuando el soporte 20 definitivo comprende inicialmente conexiones eléctricas, estas pueden constituir las conexiones C1 eléctricas de salida para los fotodetectores 10 en proceso de fabricación.

30 Las porciones 3 de cubierta, también denominadas electrodos secundarios, se forman a continuación (figura 6g), por ejemplo utilizando una etapa de enmascarado seguida de una etapa de depósito metálico, de oro en el presente caso.

35 Finalmente, la estructura 4 fotosensible es grabada hasta la capa 2 base entre las porciones 3 de cubierta (figura 6h).

40 En este ejemplo de procedimiento de fabricación, la capa 2 base constituye un primer electrodo común a los fotodetectores 10 que han sido fabricados simultáneamente, y cada porción 3 de cubierta constituye un segundo electrodo separado que se dedica individualmente a uno de los fotodetectores 10. En realizaciones alternativas, la capa 2 base puede ser interrumpida entre dos fotodetectores 10 que son vecinos, con un aislamiento eléctrico intermedio. Por tanto, las porciones 3 de cubierta pueden ser continuas entre dos fotodetectores 10 que son vecinos, para formar un segundo electrodo que es común a estos fotodetectores.

45 Conforme a la figura 7, un fotodetector 10 que es conforme a la invención puede estar asociado a una estructura 7 de lente convergente. La estructura 7 de lente es ventajosamente solidaria al fotodetector 10, con una capa 6 intermedia de un material que es transparente a la radiación R a detectar. La capa 6 posee por tanto un espesor, medido según la dirección D3, que es aproximadamente igual a la distancia F focal de la estructura 7 de lente. Por tanto, la estructura 7 de lente focaliza la radiación R sobre el fotodetector 10, conforme a la sección eficaz de este último. Son conocidos múltiples métodos de montaje por el experto en la técnica, para fijar la capa 6 al fotodetector 10, por un lado, y para fijar la estructura 7 de lente sobre la capa 6 por otro lado.

50 La estructura 7 de lente convergente puede ser una microlente planoconvexa o bien una estructura de Fresnel. Sin embargo, con preferencia, la estructura 7 de lente puede ser una lente de Huygens, por otro lado conocida por el experto en la técnica. Dicha lente de Huygens puede estar constituida por una capa metálica que está soportada por la capa 6 de material transparente, y que presenta un agujero central con ranuras periféricas. Está situada enfrentada al fotodetector 10, con una alineación según la dirección D3. El agujero central y las ranuras periféricas forman un patrón de transmisión óptico que produce la función de focalización para la radiación R. En particular, el agujero central puede ser circular y estar centrado con respecto al fotodetector 10. La distancia F focal de la lente de Huygens que es eficaz para la componente espectral de la radiación R que posee la longitud A de onda, es por tanto dada por la fórmula  $F = D_0^2 / (3 \cdot \lambda)$ , donde  $D_0$  es el diámetro del agujero central. En el caso de la presente invención, el espesor de la capa 6 según la dirección D3 debe corresponder aproximadamente a la distancia F focal para la longitud  $\lambda_r$  de onda de resonancia.

5 El fotodetector 10 provisto de la estructura 7 de lente, tal como la representada en la figura 7, está particularmente adaptado para formar un píxel de un sensor 100 de imagen. Dichos píxeles están por tanto dispuestos en líneas y columnas, según una matriz tal como la representada en la figura 8. Para la claridad de esta figura, la capa de material 6 transparente, que puede cubrir continuamente todos los fotodetectores 10, no ha sido representada, ni las estructuras 7 de lentes convergentes que se dedican una a una a los fotodetectores 10. En el ejemplo de sensor de imagen que se ha representado, todos los fotodetectores 10 comparten una misma capa metálica que constituye todas las porciones 3 de cubierta. Esta capa tiene textura en rejilla con patrón cuadrado, con el fin de permitir a la radiación R alcanzar los intervalos de concentración del campo ZC eléctrico. La misma forma por tanto un electrodo que es común a todos los fotodetectores 10 del sensor 100 de imagen. En este caso, la capa 2 base está dividida en porciones que están aisladas eléctricamente entre sí, y dedicadas una a una a los fotodetectores 10. La referencia 5 designa un mallado que está constituido de un material aislante eléctricamente, tal como sílice, y que aísla eléctricamente las porciones de capa 2 base entre sí.

15 La referencia 20' designa un conjunto de capas que está situado entre las porciones de capa 2 base y una parte 20'' de base del soporte 20. El conjunto 20' de capas contiene las conexiones C1 eléctricas de salida, las cuales están conectadas a un circuito 30 de direccionamiento. Dicho circuito 30 de direccionamiento está también conectado en la entrada a las porciones 3 de cubierta por la conexión C2 de salida, y está conectado en la salida a un circuito 40 de lectura, de manera que entrega datos de imagen que corresponden a cada imagen capturada por el sensor 100. Dichos circuitos de direccionamiento y de lectura que están concebidos para un sensor de imagen, son muy conocidos por otro lado, por lo que no es necesario describirlos de nuevo aquí.

25 El paso  $p$  de desfase de las líneas y de las columnas de píxeles en la matriz del sensor 100 de imagen, se puede seleccionar en función de la  $o$  de las longitud(es) de la (de las) radiación(es) a detectar. este paso  $p$  de desfase depende en especial de las longitudes de las ramas B1 y B2, según las direcciones D1 y D2 de los resonadores de Helmholtz que son utilizados.

30 Finalmente, es posible alternar en la matriz del sensor 100 de imagen, fotodetectores 10 que son conformes a la invención pero que están concebidos para detectar con sensibilidades respectivas máximas las radiaciones electromagnéticas cuyas longitudes de onda son diferentes. Se obtiene por tanto un sensor de imagen en color o un sensor de imagen multi espectral. Se recuerda que un fotodetector que es conforme a la invención y que está concebido para detectar una radiación electromagnética alrededor de una longitud de onda deseada, significa que la estructura fotosensible está concebida para presentar una absorción suficiente para esta longitud de onda, y que el resonador de Helmholtz está dimensionado para presentar una resonancia para esta misma longitud de onda.

35 Se entiende que la invención puede ser reproducida modificando aspectos secundarios de la misma con respecto a los ejemplos de realización que han sido descritos en detalle, a la vez que se conservan al menos ciertas de las ventajas citadas. Entre estas ventajas, las principales son recordadas a continuación:

- 40 - una fuerte exaltación del campo eléctrico, que permite un rendimiento de detección elevado;
- una ausencia de resonancias armónicas, contrariamente a la utilización de otros resonadores tales como los resonadores de Fabry-Pérot;
- 45 - valores de factor de calidad para el resonador de Helmholtz que son bastante reducidos, permitiendo al fotodetector ser eficaz en un intervalo espectral de detección que es bastante grande, en especial con una anchura espectral que puede convenir a aplicaciones de procesamiento de imagen;
- 50 - una gran tolerancia con respecto a la inclinación de la dirección de incidencia de la radiación electromagnética a detectar, permitiendo asociar el fotodetector con una lente de focalización de abertura digital elevada;
- la posibilidad de elegir una selectividad del fotodetector con respecto a la polarización de la radiación electromagnética a detectar, o de realizar un fotodetector que no es selectivo con respecto a esta polarización, por la forma del resonador de Helmholtz;
- 55 - dimensiones reducidas de cada fotodetector; y
- el fotodetector puede ser realizado con tecnologías conocidas y ya controladas, y comprende tecnologías de fabricación de circuitos integrados.

60 En particular, es posible sólo disponer la estructura 4 fotosensible sobre una parte reducida del perímetro del volumen 1 aislante, en proyección en un plano que es paralelo a la superficie S. La porción 3 de cubierta está por tanto aislada eléctricamente de la capa 2 base fuera de la estructura 4 fotosensible, por una porción de capa de un material aislante que puede ser ventajosamente muy delgada según la dirección D3, en especial más delgada que la estructura 4 fotosensible. La exaltación del campo eléctrico en la zona ZC de concentración que contiene la estructura 4 fotosensible, es por tanto incluso más fuerte de esta forma.

## REIVINDICACIONES

1. Fotodetector (10) con resonador de Helmholtz, eficaz para detectar al menos una radiación (R) electromagnética que tiene una longitud de onda comprendida entre  $0,3 \mu\text{m}$  y  $15 \mu\text{m}$ , el resonador de Helmholtz que comprende:

- un volumen (1) aislante eléctricamente; y

- caras (11-14) metálicas que rodean el volumen (1) aislante a lo largo de al menos un recorrido en bucle alrededor de dicho volumen aislante, fuera de dos interrupciones del recorrido en bucle, de manera que las caras metálicas constituyen dos electrodos que están separados entre sí por al menos un intervalo, denominado intervalo (ZC) de concentración del campo eléctrico y que contienen las interrupciones del recorrido en bucle;

dicho intervalo (ZC) de concentración de campo eléctrico que tiene un espesor entre los dos electrodos que es más pequeño que un espesor del volumen (1) aislante, siendo medidos dichos espesores según una dirección (D3) común, de manera que cuando la radiación (R) es incidente sobre el resonador, un campo eléctrico que es creado por dicha radiación en el resonador sea más intenso en el intervalo de concentración del campo eléctrico que en el volumen aislante,

el volumen (1) aislante y las caras (11-14) metálicas que tienen dimensiones adaptadas para producir una resonancia del campo eléctrico en el intervalo (ZC) de concentración del campo eléctrico cuando la longitud de onda de la radiación (R) varía entre  $0,3 \mu\text{m}$  y  $15 \mu\text{m}$ , y el fotodetector (10) que comprende además:

- al menos una estructura (4) fotosensible, que está hecha a base de al menos un material semiconductor, que es absorbente para la radiación (R), que está dispuesta al menos en parte en el intervalo (ZC) de concentración del campo eléctrico y que está en contacto eléctrico con cada uno de los dos electrodos; y

- dos conexiones (C1, C2) eléctricas de salida, que están conectadas eléctricamente una a una a los dos electrodos y adaptadas para transmitir una señal eléctrica de detección que es generada en la estructura (4) fotosensible cuando la radiación (R) es incidente sobre el resonador de Helmholtz,

la estructura (4) fotosensible que tiene un intervalo espectral de detección que contiene un intervalo espectral de la resonancia del campo eléctrico.

2. Fotodetector (10) según la reivindicación 1, en el cual el volumen (1) aislante eléctricamente es rectilíneo y alargado en una primera dirección (D1) y cada intervalo (ZC) de concentración del campo eléctrico es también rectilíneo y alargado en la primera dirección.

3. Fotodetector (10) según la reivindicación 1, en el cual el volumen (1) aislante posee dos ramas (B1, B2) rectilíneas y alargadas que son perpendiculares entre sí, y cada intervalo (ZC) de concentración del campo eléctrico comprende, para cada rama del volumen aislante, un segmento de intervalo que es también rectilíneo y alargado paralelamente a dicha rama, y que comprende un segmento de la estructura (4) fotosensible.

4. Fotodetector (10) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el cual las caras (11-14) metálicas forman por un lado una cubeta que tiene un fondo (13) y dos caras (11, 12) laterales que se extienden continuamente a partir de dos lados opuestos del fondo, y forman por otro lado una cara (14) de cubierta que está enfrentada al fondo, de manera que el volumen (1) aislante esté situado entre el fondo de la cubeta y la cara de la cubierta, y simultáneamente entre las dos caras laterales de la cubeta, y cada intervalo (ZC) de concentración del campo eléctrico está situado entre el borde lateral de la cara de cubierta y un borde de una de las caras laterales de la cubeta que es opuesto al fondo de dicha cubeta.

5. Fotodetector (10) según la reivindicación 4, en el cual las dos caras (11, 12) laterales de la cubeta son paralelas y separadas por una anchura ( $w_b$ ) de cubeta comprendida entre  $0,5 \mu\text{m}$  y  $0,25 \mu\text{m}$ , y en la cual el fondo (13) de la cubeta y la cara (14) de cubierta son paralelas y separadas por un espesor ( $h_b$ ) del volumen (1) aislante comprendido entre  $0,03 \mu\text{m}$  y  $0,25 \mu\text{m}$ .

6. Fotodetector (10) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el cual el espesor ( $w_r$ ) de cada intervalo (ZC) de concentración del campo eléctrico, medido de un electrodo al otro, está comprendido entre  $10 \text{ nm}$  y  $100 \text{ nm}$ , y cada intervalo de concentración del campo eléctrico a una anchura ( $h_r$ ) medida paralelamente a al menos uno de los electrodos a nivel de dicho intervalo de concentración del campo eléctrico, que está comprendida entre  $10 \text{ nm}$  y  $50 \text{ nm}$ .

7. Fotodetector (10) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el cual cada electrodo está constituido al menos en parte por uno de los metales siguientes: oro, plata, cobre, aluminio, o por una aleación que comprende al menos uno de dichos metales.

8. Fotodetector (10) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el cual cada estructura (4) fotosensible comprende una de entre una unión PiN, una porción de un material semiconductor, y un apilamiento de capas múltiples de pozo cuántico.
- 5 9. Fotodetector (10) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además una estructura (7) de lente convergente que está dispuesta fijamente con respecto al resonador de Helmholtz de manera que focaliza la radiación (R) sobre dicho resonador de Helmholtz, cuando dicha radiación es incidente sobre la estructura de lente.
- 10 10. Fotodetector (10) según la reivindicación 9, que comprende además una capa (6) de un material transparente para la radiación (R), que está dispuesto entre el resonador de Helmholtz y la estructura (7) de lente, de manera que el resonador de Helmholtz, cada estructura (4) fotosensible, la capa del material transparente y la estructura de lente sean solidarias en el seno de un bloque rígido.
- 15 11. Fotodetector (10) según la reivindicación 9 o 10, en el cual la estructura (7) de lente comprende una capa metálica que está provista de un agujero enfrentado al resonador de Helmholtz, y provisto además de ranuras dispuestas alrededor del agujero, para constituir una lente de Huygens.
- 20 12. Procedimiento de fabricación de un fotodetector (10), estando conformado dicho fotodetector conforme a una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, el procedimiento que comprende las etapas siguientes:
- /1/ en un soporte (21) temporal, formación de dicha al menos una estructura (4) fotosensible y de una porción de material aislante eléctricamente como volumen (1) aislante, y después formación de un primero de los electrodos por encima de la estructura fotosensible y el volumen aislante;
- 25 /2/ adhesión de un soporte (20) definitivo sobre el primer electrodo, de un lado de dicho primer electrodo que es opuesto al soporte (21) temporal;
- /3/ retirada del soporte (21) temporal; y
- 30 /4/ depósito de un segundo de los electrodos sobre la estructura (4) fotosensible y la porción de material aislante, de un lado de dicha estructura fotosensible y de dicha porción de material aislante que es opuesto al soporte (20) definitivo.
- 35 13. Sensor (100) de imagen que comprende una matriz de fotodetectores (10) conformes, cada uno, a una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, estando dispuestos los fotodetectores en cruzamientos de líneas y de columnas de dicha matriz, y comprendiendo el sensor de imagen además un sistema (30) de direccionamiento adaptado para seleccionar cada fotodetector individualmente, y un sistema (40) de lectura adaptado para leer la señal eléctrica de detección que es transmitida por las dos conexiones (C1, C2) eléctricas de salida de uno
- 40 cualquiera de los fotodetectores cuando dicho fotodetector es seleccionado por el sistema de direccionamiento.
- 45 14. Sensor (100) de imagen según la reivindicación 13, que tiene un paso de líneas o de columnas que está comprendido entre 2  $\mu\text{m}$  y 20  $\mu\text{m}$  cuando cada fotodetector (10) es eficaz para detectar una radiación (R) de longitud de onda comprendida entre 0,8  $\mu\text{m}$  y 15  $\mu\text{m}$ , o bien que tiene un paso de líneas o de columnas que está comprendido entre 0,1  $\mu\text{m}$  y 2  $\mu\text{m}$  cuando cada fotodetector es eficaz para detectar una radiación de longitud de onda comprendida entre 0,3  $\mu\text{m}$  y 0,8  $\mu\text{m}$ .

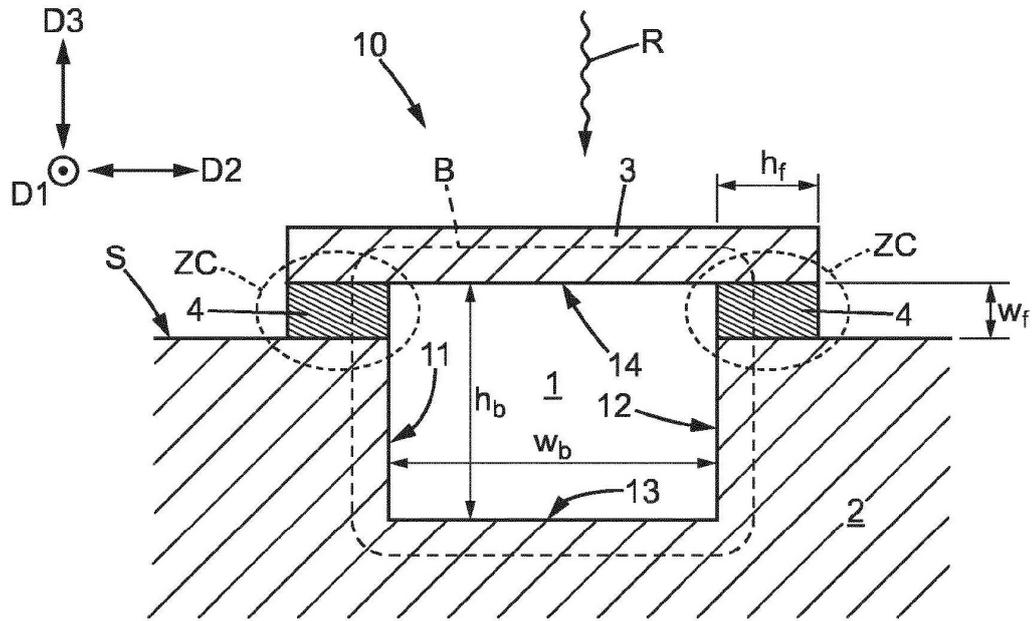


FIG. 1

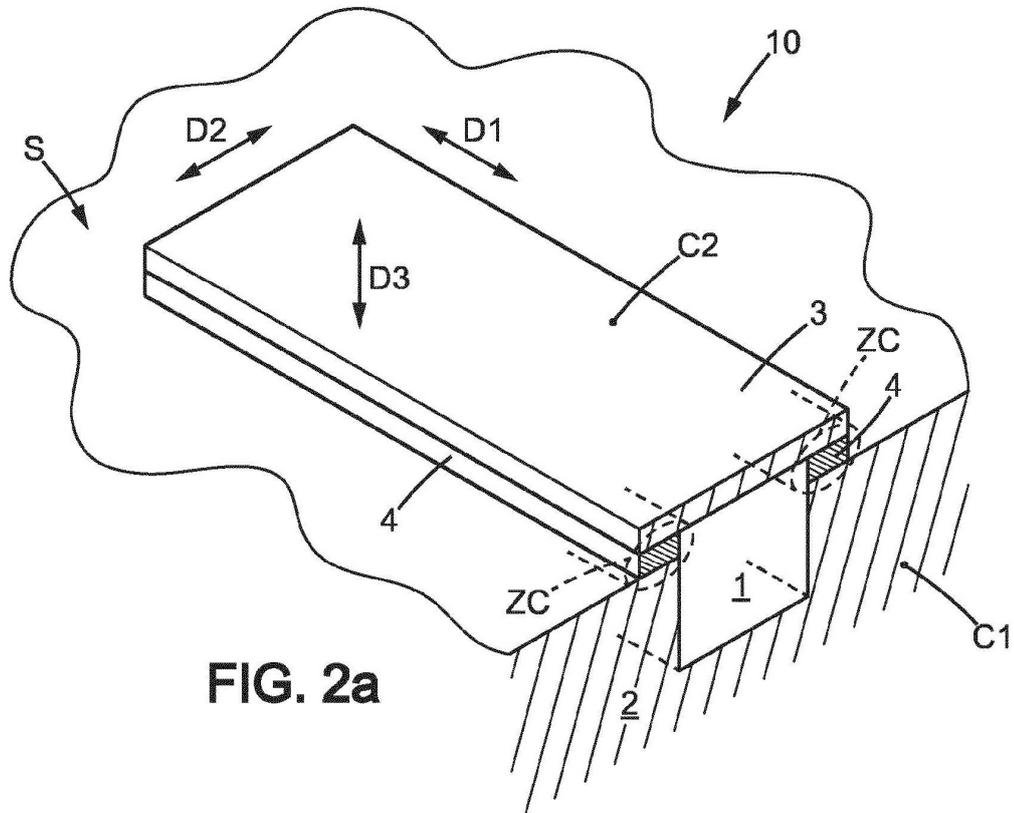


FIG. 2a

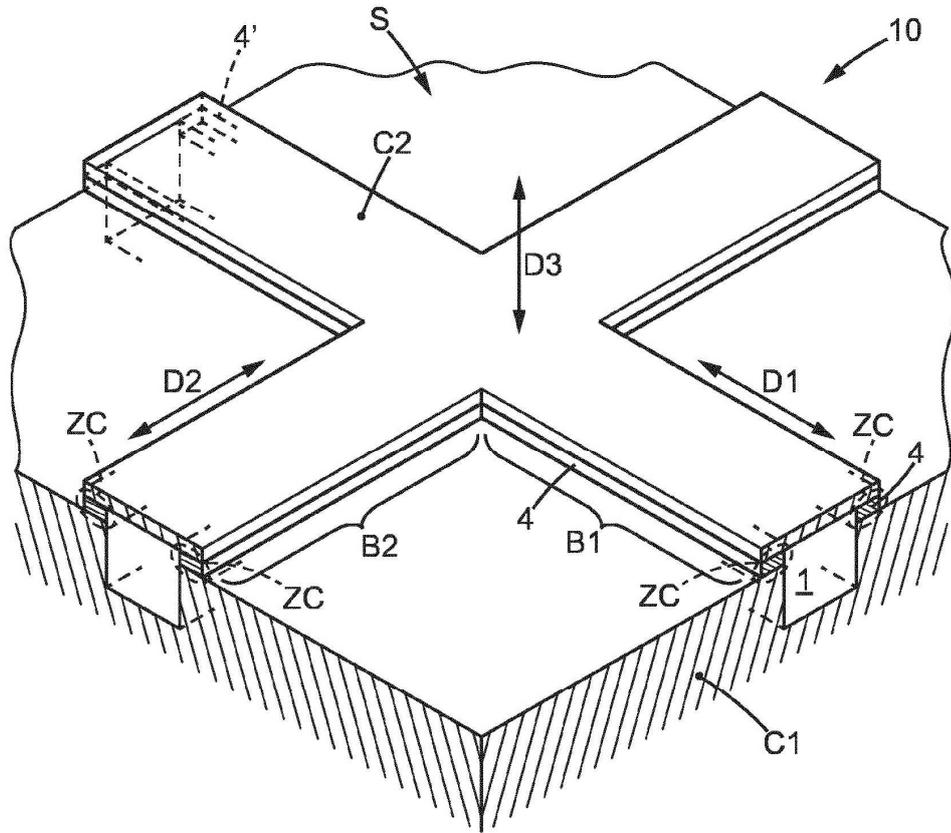


FIG. 2b

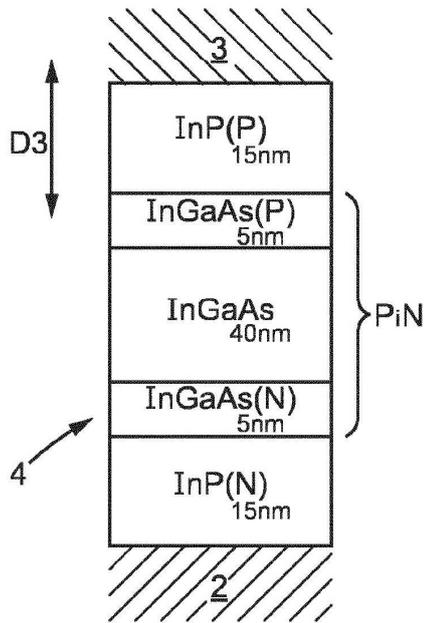


FIG. 3a

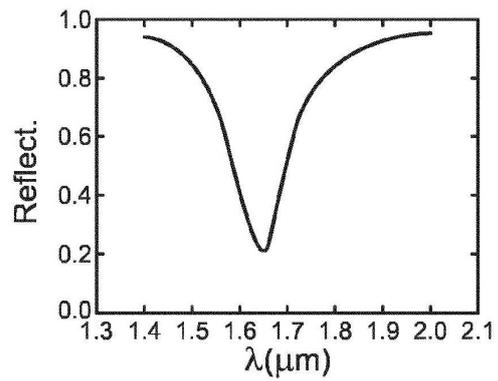
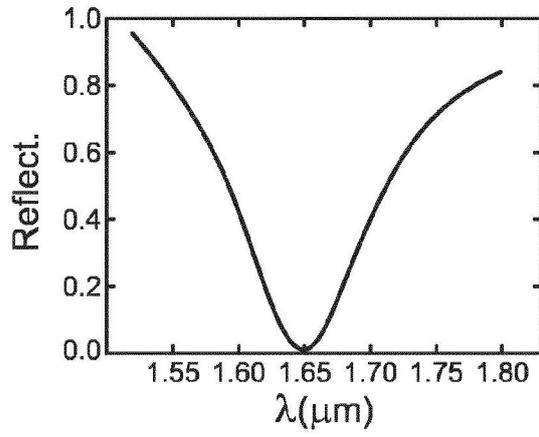
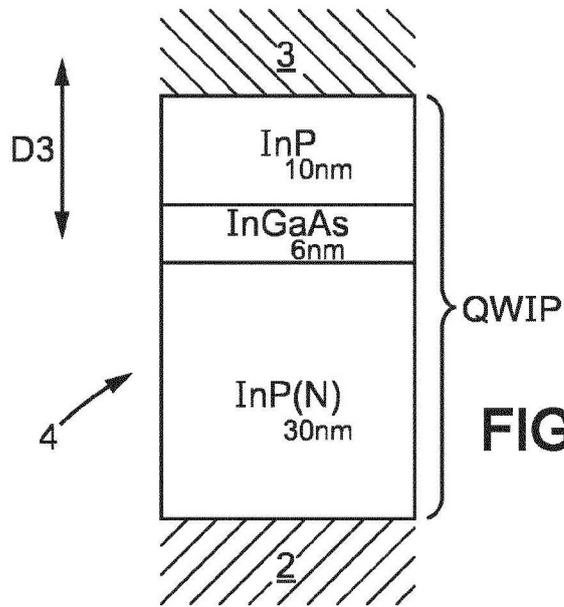


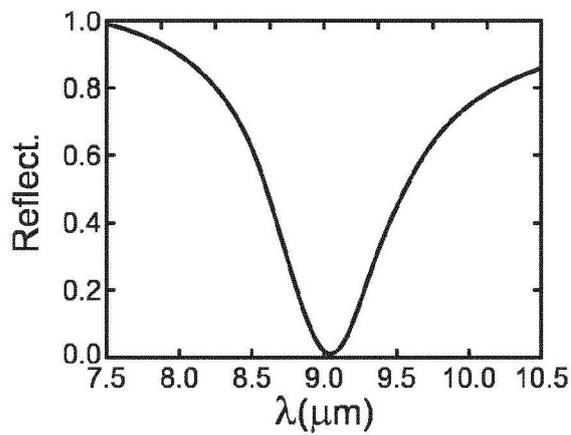
FIG. 3b



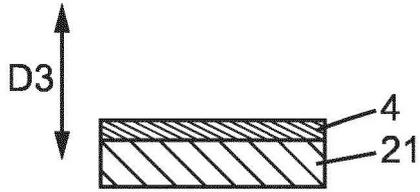
**FIG. 4**



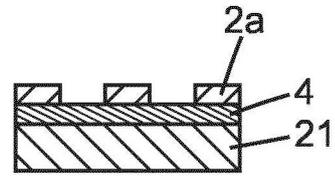
**FIG. 5a**



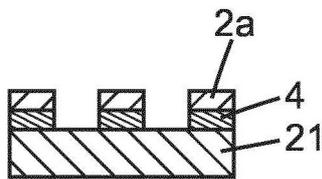
**FIG. 5b**



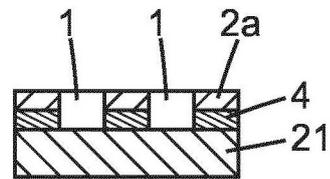
**FIG. 6a**



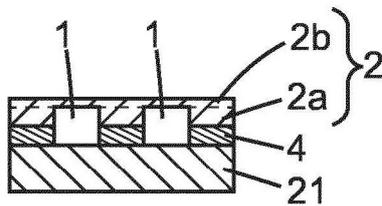
**FIG. 6b**



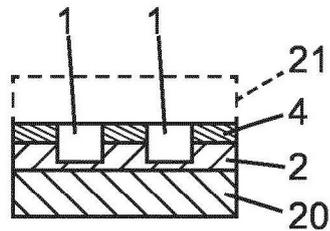
**FIG. 6c**



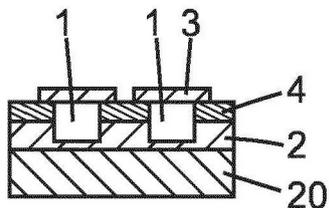
**FIG. 6d**



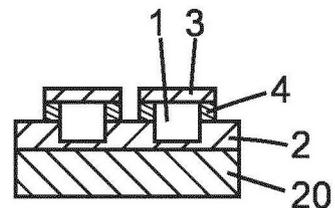
**FIG. 6e**



**FIG. 6f**



**FIG. 6g**



**FIG. 6h**

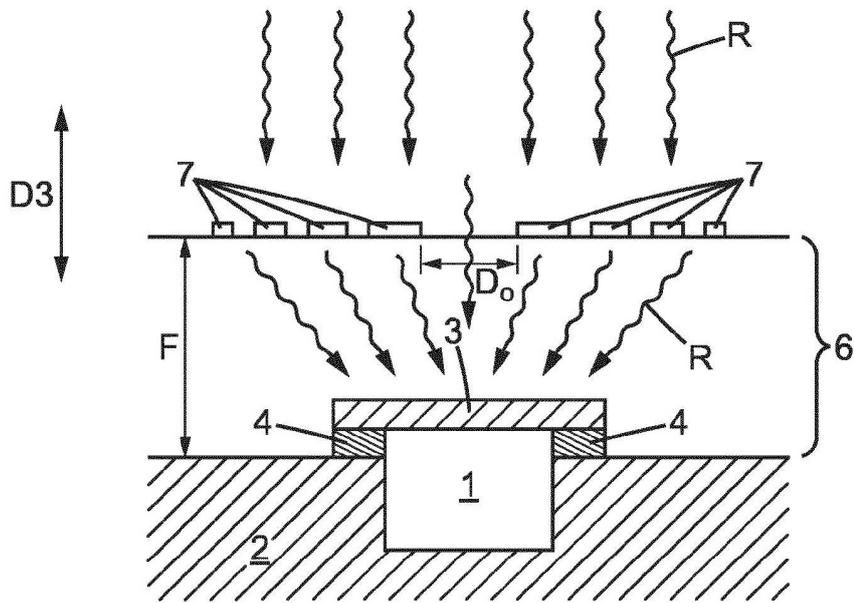


FIG. 7

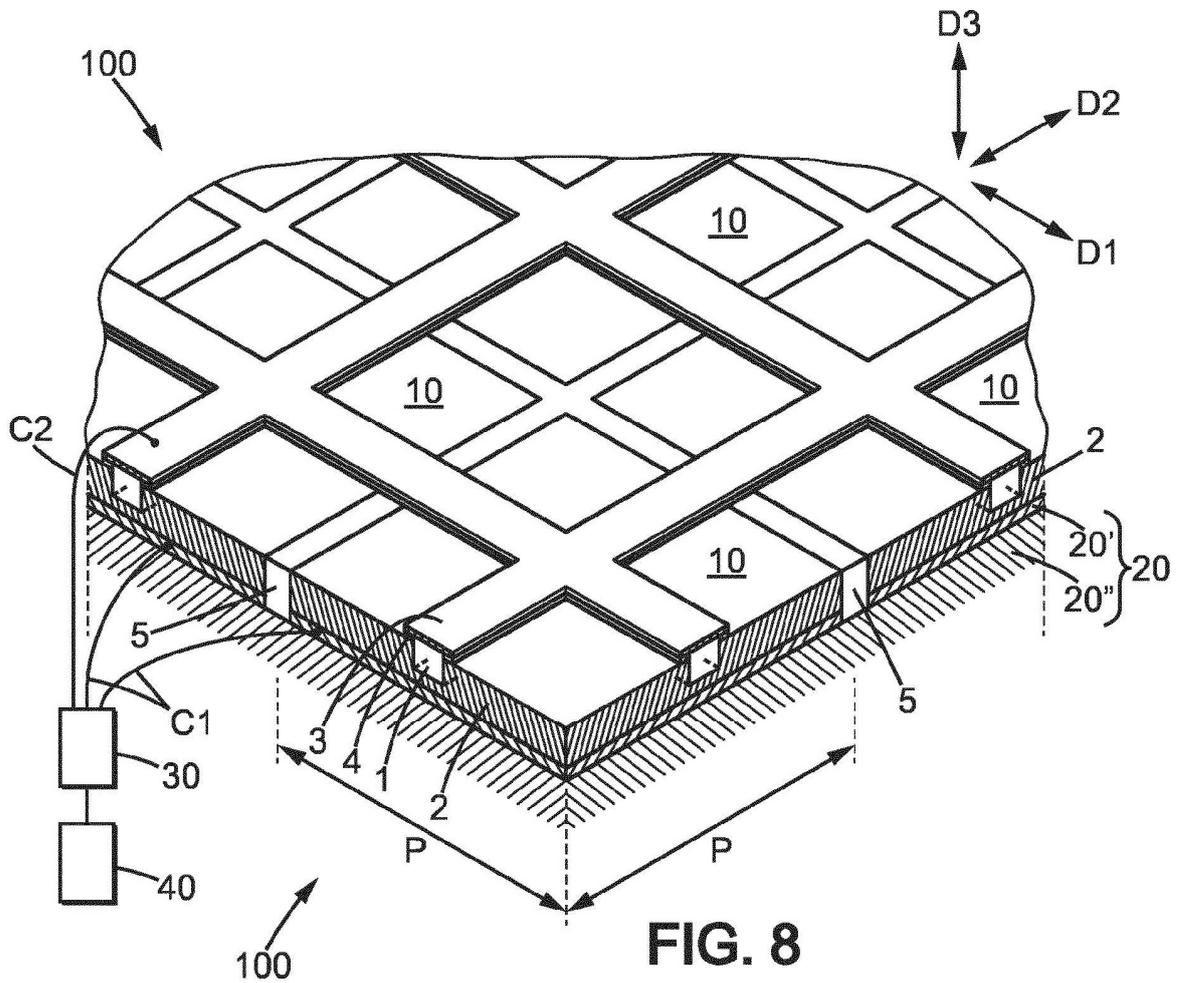


FIG. 8