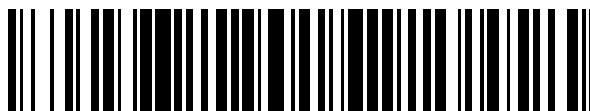


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 385 288**

51 Int. Cl.:

H01S 5/10 (2006.01)

H01S 1/02 (2006.01)

H01S 5/34 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **09761892 .0**

96 Fecha de presentación: **12.05.2009**

97 Número de publicación de la solicitud: **2289134**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **02.03.2011**

54 Título: **Dispositivo láser de emisión de ondas terahercios**

30 Prioridad:
13.06.2008 FR 0853939

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
20.07.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
20.07.2012

73 Titular/es:
**COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET
AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Bâtiment "Le Ponant D" 25, rue Leblanc
75015 Paris, FR y
Université Paris Diderot - Paris 7**

72 Inventor/es:
**CLAUDON, Julien;
GERARD, Jean-Michel;
BERGER, Vincent;
LEO, Guiseppe y
ANDRONICO, Alessio**

74 Agente/Representante:
de Elzaburu Márquez, Alberto

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).

ES 2 385 288 T3

DESCRIPCIÓN

Dispositivo láser de emisión de ondas Terahercios.

La presente invención se refiere a un dispositivo láser de emisión de onda en una gama de frecuencia comprendida entre 0,5 THz y 5 THz.

- 5 El ámbito de Terahercios (THz) del espectro electromagnético está comprendido entre las microondas y el infrarrojo lejano y se extiende de 500 GHz (0,5 THz) a 5 THz (típicamente 1 THz corresponde a una energía de 4 meV o también a una longitud de onda en el vacío de 300 μm).

- 10 Las fuentes THz encuentran sus principales aplicaciones en la espectroscopia y las imágenes en los ámbitos de la seguridad y de la medicina. Se pueden, por otra parte, emplear para las telecomunicaciones en espacio libre a corta distancia (por ejemplo en el interior de los edificios) para el análisis no destructivo de alimentos, de capas de acabado, de circuitos integrados. Las tecnologías THz se describen de manera general en los documentos "Cutting-edge terahertz technology" (M. Tonouchi, Nature Photonics, febrero 2007, pág. 97) y "Terahertz technology: a land to be discovered" (M. Koch, Optics and Photonics News, marzo 2007, pág. 21).

- 15 En el contexto de la espectroscopia THz, se distinguen en general la espectroscopia de banda ancha en el ámbito temporal (THz-TDS o "THz Time Domain Spectroscopy") y la espectroscopia que utiliza una fuente THz monocromática (CW o "Continuous Wave"). Debido a su resolución frecuencial intrínsecamente limitada, los sistemas TDS se emplean sobre todo para la espectroscopia de estructuras de bajos factores de calidad. En efecto, en un experimento de TDS típico, la ventana de tiempo es de 100 ps, de ahí una resolución frecuencial de 5 GHz. Por otra parte, las fuentes THz continuas y monocromáticas CW encontraron un extenso ámbito de aplicación en
20 espectroscopia astronómica o en el estudio de las reacciones químicas que se desarrollaban en la alta atmósfera, donde las resonancias THz puestas en juego tienen a menudo factores de calidad entre 10^2 y 10^6 .

- 25 La espectroscopia THz presenta, por otra parte, grandes aplicaciones en seguridad civil y militar, por ejemplo en la detección de agentes químicos o de explosivos. En todas las situaciones donde el producto analizado se encuentra en fase gaseosa, los espectros adquiridos por un método CW tienen una resolución bien superior a la de los espectros obtenidos por un modo TDS. La tecnología TDS por su parte se utiliza en gran medida para la caracterización de materiales en fase condensada.

- 30 En lo que se refiere a las fuentes TDS, las fuentes tradicionales de radiación THz, tal como los láseres de gas o los osciladores "backward wave oscillators", son costosas e incómodas. Las fuentes THz que se basan en conjuntos de osciladores sólidos también son costosas. En la actualidad, los dispositivos más utilizados para generar y detectar impulsos THz de banda ancha son las antenas dipolares fotoconductoras excitadas por un láser femtosegundo, que es a menudo costoso y voluminoso. Se describen tales dispositivos en el documento "Sensing with Terahertz Radiation" (D. Mittleman Springer-Verlag, Heidelberg (2003)).

Se conocen por otra parte distintas fuentes de tipo CW.

- 35 Una primera fuente conocida de tipo monocromático CW utiliza la técnica de fotomezcla o "Photomixing" el heterodínaje óptico permite generar una onda THz continua. La pulsación de dos diodos láser continuos que emiten alrededor de 800 nm y no sintonizados de algún THz induce una oscilación de carga en la banda de conducción de un semiconductor tal como GaAs o InGaAs semiaislantes.

- 40 No obstante, las demostraciones realizadas hasta ahora son sistemas no integrados y las potencias THz máximas generadas siguen siendo relativamente bajas, del orden de 100 nW, tal como lo muestran los documentos "Photomixing up to 3,8 THz in low-temperature-grown GaAs" (E. R. Brown et al. Appl. Phys. Lett. 66, 285, (1995)) y "Generation and detection of coherent terahertz waves using two photomixers" (S. Verghese et al, Appl. Phys. Lett. 73, 3824 (1998)).

- 45 Los láseres de cascada cuántica constituyen un segundo tipo de fuentes monocromáticas CW en el ámbito THz. Dichas fuentes se describen en los documentos "Terahertz semiconductor-heteroestructura laser", R. Kohler et al, Nature 417, 156 (2002) "Microcavity terahertz quantum-cascade Laser", G. Fasching et al, Infrared to Terahertz technologies for Health and the Environment Proceedings of the SPIE vol. 6010, 601006-1 to 601006-11. (9-11-2005). Estas fuentes permiten generar una potencia más elevada, pero son poco sintonizables y no funcionan más que a temperaturas criogénicas. Por esta última razón, estas fuentes son sistemas incómodos y complejos.

- 50 Una tercera fuente conocida de tipo CW utiliza la técnica de conversión de frecuencia. Los efectos no lineales de segundo orden se utilizan así para la generación y la amplificación de THz, siguiendo distintos enfoques:

- mezcla de láseres medio infrarroja en el GaAs masivo tal como describe en el documento a "Noncolinear phase matching in GaAs" (L. Aggarwal et al, Appl. Phys. Lett. 22, 239, (1973));
- mezcla de impulsos ultra breves infrarrojos cercano en cristales tales como ZnSe, LiNbO₃ tal como se describe en el documento "Generation of Far-Infrared Radiation by Picosecond Light Pulses en LiNbO₃" (K. H. Yang et al, Appl. Phys. Lett. 19, 320, (1971)), o LiNbO₃ invertido periódicamente (PPLN o "Periodically

Poled Lithium Niobate”) tal como se describe en el documento “Generation of narrow-band terahertz radiation via optical rectification of femtosecond pulses in periodically poled lithium niobate” (Y. - S. Lee et al, Appl. Phys. Lett. 76, 2505 (2000)).

5 Debido a su fuerte coeficiente no lineal y sus bajas pérdidas en el ámbito THz ($\sim 1 \text{ cm}^{-1}$), el GaAs constituye un material de elección para estas aplicaciones. El documento “Terahertz-wave generation in quasi-phase-matched GaAs” (K. L. Vodopyanov et al, Appl. Phys. Lett. 89, 141119, (2006)) describe la generación de ondas THz de 0,9 a 3 THz en el GaAs periódicamente invertido, con una eficacia de conversión de 10^{-3} utilizando dos haces de bombeo próximos a $3 \mu\text{m}$.

10 No obstante, todos estos sistemas no son ni compactos, ni fáciles de emplear fuera de un laboratorio de investigación.

El documento “Nonlinear phase matching in THz semiconductor waveguides” (V. Berger and C. Sirtori, Semicond. Sci. Technol. 19, 964 (2004)) propone explotar la dispersión anormal creada por la absorción por la banda de fonón en GaAs para conceder en fase dos haces de bombeo cercana IR (Infrarrojo) y el haz THz generado en una guía de onda de tipo “ridge”; esta propuesta no fue todavía objeto de una demostración experimental. Por otra parte, al igual

15 que las otras soluciones, no permite obtener un sistema compacto.

En este contexto, la presente invención tiene por objeto proporcionar un dispositivo láser compacto de emisión de onda luminosa en una gama de frecuencia comprendida entre 0,5 THz y 5 THz que permite liberarse de las limitaciones mencionadas más arriba en términos de molestia, de complejidad y de coste.

20 A tal efecto, la invención propone un dispositivo láser de emisión de onda en una gama de frecuencia comprendida entre 0,5 THz y 5 THz que incluye una heteroestructura semiconductor, siendo dicho dispositivo caracterizado porque dicha heteroestructura es de forma cilíndrica de sección circular, incluyendo dicha heteroestructura:

- una primera capa de material semiconductor ópticamente no lineal que incluye medios emisores aptos para emitir en al menos dos modos de galería ópticos que pertenecen al infrarrojo cercano, siendo dichos al menos dos modos de galería confinados en dicha primera capa y permitiendo la generación en el seno de dicha primera capa de una radiación en un modo de galería electromagnético de frecuencia comprendida entre 0,5 THz y 5 THz, dicho modo Terahercios, siendo dicha radiación obtenida por diferencia de las frecuencias de dichos dos modos de galería, asegurando la geometría cilíndrica de dicha heteroestructura el apareo de fases entre los dos modos de galería ópticos que pertenecen al infrarrojo cercano y el modo Terahercios a la diferencia de frecuencia;
- una segunda y una tercera capa de material semiconductor que presenta cada una un índice óptico más bajo que el índice del material utilizado para dicha primera capa y situadas en una parte y otra de dicha primera capa;
- al menos una capa metálica situada en un extremo de dicha heteroestructura.

Se entiende por infrarrojo cercano una radiación de longitud de onda comprendida entre $0,7 \mu\text{m}$ y $1,4 \mu\text{m}$.

35 Se entiende por modo de galería óptico un modo resultante de la reflexión de rayos luminosos sobre la pared cilíndrica interior de la primera capa que forma microcavidad realizada de un material cuyo índice de refracción es más elevado que el medio que lo rodea (i.e. el aire). Los rayos permanecen en general confinados a lo largo de la pared cilíndrica y no pasan por el centro de la microcavidad.

40 Gracias a la invención, la onda THz es generada por diferencia de frecuencia (i.e. conversión paramétrica) a partir de dos modos de galería que pertenecen al infrarrojo cercano y presentes en dicha primera capa central que forma microcavidad de tipo microcilíndro: la reflexión sobre el interfaz semiconductor-aire del microcilíndro conduce a la formación de modos de galería THz. Los modos de galería de muy alto factor de calidad son excitados por emisores tales como puntos o pozos cuánticos. Los emisores son bombeados preferentemente eléctricamente pero pueden también ser bombeados ópticamente.

45 El dispositivo según la invención permite la emisión continua o casi continua de radiaciones electromagnéticas THz.

La geometría cilíndrica de la invención con emisores en el interior de la primera capa cilíndrica permite conseguir la generación de altas potencias THz en el seno de una fuente compacta. La simetría cilíndrica de la primera capa central en material semiconductor ópticamente no lineal tal como el GaAs favorece el apareo de fases entre los modos de galería ópticos y el modo THz.

50 La capa metálica situada en un extremo de la heteroestructura cilíndrica asegura el confinamiento vertical del modo THz según el principio de las guías metálicas plasmónicas. Este confinamiento permite aumentar la eficacia del rendimiento de conversión no lineal. La capa metálica permite también la inyección de los portadores de carga en el caso de un bombeo eléctrico de los emisores.

La geometría según la invención permite, por otra parte, optimizar simultánea e independientemente el

- 5 confinamiento vertical de los modos de galería ópticos y el del modo THz, jugando sobre los espesores de las diferentes capas, en particular los espesores de las segundas y terceras capas en material semiconductor tal como el AlGaAs. Esto permite maximizar el solapamiento entre los modos ópticos y el modo THz. Se tendrá en cuenta que las segundas y terceras capas permiten no sólo regular el espaciado entre el espejo y la capa activa que incluye los emisores sino también realizar el confinamiento óptico lateral del modo THz.
- 10 La geometría según la invención ofrece además debido a su forma cilíndrica sin estrechamiento, una buena evacuación del calor hacia el sustrato, asegurando la estabilidad en potencia de las propiedades del láser y permitiendo alcanzar potencias láser compatibles con la generación no lineal de THz.
- Según un modo especialmente ventajoso de la invención, dicha heteroestructura de forma cilíndrica incluye una zona central semiaislante que se extiende sensiblemente entre los dos extremos de dicha heteroestructura.
- Esta zona central permite mejorar el rendimiento del dispositivo según la invención, cuando este último se bombea eléctricamente, puesto que la corriente de bombeo se canaliza entonces eficazmente en la zona activa del dispositivo, es decir, la circunferencia de la primera capa activa que soporta los modos de galería cercanos infrarrojos.
- 15 El dispositivo según la invención puede también presentar una o varias de las características siguientes, consideradas individualmente o según todas las combinaciones técnicamente posibles:
- dicho dispositivo según la invención incluye dos capas metálicas situadas, cada una, a un extremo de dicha heteroestructura;
 - dicha o dichas capas metálicas se realizan de oro;
 - 20 - dichos medios emisores se realizan según una de las siguientes formas:
 - o uno o una pluralidad de pozos cuánticos;
 - o uno o una pluralidad de planos de puntos cuánticos;
 - o uno o una pluralidad de estructuras en cascada cuántica;
 - 25 - dicho material semiconductor ópticamente no lineal de dicha primera capa es un material III-V tal como el GaAs o InGaAsP o un material II-VI;
 - el material semiconductor de dichas segunda y tercera capa es de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ con $0,2 < x < 0,6$ o de InP;
 - dicha segunda capa semiconductora es una capa dopada p y dicha tercera capa semiconductora es una capa dopada n;
 - dicha primera capa incluye una pluralidad de planos de emisores;
 - 30 - dicha heteroestructura de forma cilíndrica incluye dos capas semiconductoras, recubriendo dichas capas de protección contra la oxidación, respectivamente dichas segundas y terceras capas;
 - cada una de dichas capas de protección contra la oxidación tiene un espesor comprendido entre 2 y 10 nm;
 - el espesor de dichas segunda y tercera capa está comprendido entre 0,5 y 5 μm ;
 - 35 - el dispositivo según la invención incluye dos contactos eléctricos para la inyección de una corriente de bombeo de dichos medios emisores;
 - el espesor de dicha primera capa está comprendido entre 200 y 400 nm;
 - el diámetro de dicha heteroestructura cilíndrica está comprendido entre 30 y 100 μm ;
 - dicha primera capa es una capa no intencionalmente dopada.
- La presente invención tiene también por objeto un sistema criogénico que integra un dispositivo según la invención.
- 40 La presente invención tiene también por objeto una red que incluye una pluralidad de dispositivos según la invención, caracterizada porque cada uno de dichos dispositivos presenta sensiblemente la misma frecuencia.
- Según un primer modo de realización, dichos dispositivos de la red son suficientemente próximos unos de otros para acoplar los campos evanescentes THz de los distintos dispositivos.
- 45 Según un segundo modo de realización, se reinyecta una parte de la radiación THz emitida por dicha red en dicha red.

La presente invención tiene también por objeto una red que incluye una pluralidad de dispositivos según la invención, caracterizada porque cada uno de dichos dispositivos presenta frecuencias THz diferentes, siendo cada uno de dichos dispositivos controlado individualmente.

5 Finalmente, la presente invención tiene por objeto un procedimiento de realización de un dispositivo según la invención, caracterizado porque incluye las siguientes etapas:

- Crecimiento epitaxial por deposición sobre un sustrato semiconductor de una estructura que incluye al menos las capas siguientes en este orden a partir del sustrato:
 - o una capa semiconductor sacrificatoria;
 - o una primera capa semiconductor de protección;
 - 10 o una capa realizada de un material semiconductor idéntico al de dicha segunda capa;
 - o una capa realizada de un material semiconductor idéntico al de dicha primera capa, incluyendo dicha capa medios emisores;
 - o una capa realizada de un material semiconductor idéntico al de dicha tercera capa;
 - o una segunda capa semiconductor de protección;
 - 15 - Redistribución sobre un sustrato huésped previamente metalizado de dicha estructura epitaxial de tal modo que la segunda capa de protección esté en contacto con el metal de dicho sustrato huésped;
 - Adelgazamiento de dicho sustrato semiconductor por abrasión mecánica;
 - Ataque químico selectivo de dicho sustrato sobre el espesor restante, siendo dicha capa sacrificatoria utilizada como capa de detención;
 - 20 - Ataque químico selectivo de dicha capa sacrificatoria, siendo dicha primera capa de protección utilizada como capa de detención;
 - Realización de una máscara que define una abertura de diámetro inferior al diámetro de la heteroestructura de forma cilíndrica;
 - Implantación iónica que vuelve semiaislante la zona no protegida por dicha máscara;
 - 25 - Eliminación de dicha máscara;
 - Deposición de una capa metálica circular de diámetro igual al diámetro de la heteroestructura de forma cilíndrica;
 - Grabado de las partes no recubiertas por dicha capa metálica circular de tal modo que forme la heteroestructura de forma cilíndrica.
 - 30 Ventajosamente, dicha máscara define una abertura de diámetro inferior de 1 a 2 μm al diámetro de la heteroestructura de forma cilíndrica.
- Otras características y ventajas de la invención resultarán claramente de la descripción que se da más abajo, a título indicativo y de ninguna manera limitativo, en referencia a las figuras anexas, entre las cuales:
- las figuras 1a a 1c ilustran un ejemplo de realización de un dispositivo láser según la invención;
 - 35 - las figuras 2a a 2f ilustran las distintas etapas de un procedimiento de fabricación de un dispositivo tal como se representa en las figuras 1a a 1c;
 - la figura 3 representa esquemáticamente una red que integra una pluralidad de dispositivos según la invención y que forma una fuente ágil en frecuencia.

40 En todas las figuras, los elementos comunes llevan los mismos números de referencia.

La figura 1a representa un modo de realización de un dispositivo láser 1 según la invención.

La figura 1c es una vista en corte según un plano vertical de este mismo dispositivo 1.

El dispositivo 1 según la invención es una fuente continua o casi continua de radiaciones electromagnéticas THz. La generación de la radiación THz está asegurada por conversión paramétrica (i.e. diferencia de frecuencias) a partir de

dos modos ópticos de un microláser semiconductor de modos de galería.

El dispositivo 1 incluye así una heteroestructura semiconductor 2 cilíndrica de la cual los extremos están, cada uno, cubierto con una capa metálica (por ejemplo de oro) que forma respectivamente un espejo superior 3 y un espejo inferior 4. El diámetro de la heteroestructura cilíndrica 2 está típicamente comprendido entre 30 y 100 μm .

- 5 Esta heteroestructura semiconductor 2 reposa sobre un sustrato huésped 15 buen conductor de calor y de electricidad, por ejemplo, un sustrato metálico o un sustrato GaAs dopado.

La figura 1b representa las distintas capas de la heteroestructura semiconductor 2 de geometría cilíndrica.

Así esta heteroestructura 2 incluye de abajo hacia arriba:

- el espejo inferior 4;
- 10 - una fina capa 5 (algunos nm, típicamente entre 2 y 10 nm) de GaAs dopada n;
- una capa 6 de aleación $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ dopada n (con típicamente $0,2 < x < 0,6$) cuyo índice óptico es más bajo que el del GaAs y cuyo espesor, por ejemplo, está comprendido entre 0,5 y 5 μm y preferentemente está comprendido entre 0,5 y 3 μm ;
- una capa activa 7;
- 15 - una capa 8 de aleación $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ dopada p (con típicamente $0,2 < x < 0,6$) cuyo índice óptico es más bajo que el del GaAs y cuyo espesor, está, por ejemplo, comprendido entre 0,5 y 5 μm y preferentemente está comprendido entre 0,5 y 3 μm ;
- una fina capa 9 (algunos nm, típicamente entre 2 y 10 nm) de GaAs dopada n;
- el espejo superior 3.

- 20 La capa activa 7 es una capa de GaAs no intencionalmente dopada que tiene un espesor típicamente comprendido entre comprendida entre 200 y 400 nm (por ejemplo 300 nm). La capa 7 de GaAs contiene además un medio emisor, aquí una pluralidad de planos 10 de puntos cuánticos 11: un único plano de puntos cuánticos puede ser suficiente y se pueden también utilizar uno o varios pozos cuánticos. El medio emisor se bombea aquí eléctricamente. Dos contactos eléctricos 12 y 13 están previstos a tal efecto y representados en la figura 1c que es un corte según un plano vertical del dispositivo 1 tal como se representa en figura 1a. Se realiza aquí el contacto 12 sobre el espejo superior 3 que hace, por lo tanto, también cargo del electrodo superior de inyección. El contacto 13 se realiza en la cara posterior del sustrato huésped 15 (veremos a lo largo de la descripción del procedimiento de fabricación que se pueden considerar otras configuraciones de contacto). El medio emisor bombeado eléctricamente supone por supuesto un dopaje adecuado de la heteroestructura semiconductor 2. Así, tal como se describe más arriba, la capa 6 de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ inferior y la fina capa 5 de GaAs en contacto con el espejo inferior 4 son dopadas n mientras que la capa 8 de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ superior y la fina capa 9 de GaAs en contacto con el espejo superior 3 son dopadas p.

Se tendrá en cuenta que las finas capas 5 y 9 sólo están representadas en figura 1b por deseo de simplificación de las figuras 1a y 1c.

- 35 El medio emisor 10 proporciona la ganancia necesaria para hacer láser simultáneamente varios modos ópticos de galería en el infrarrojo cercano. Tal como ya se mencionó más arriba, se entiende por infrarrojo cercano una radiación de longitud de onda comprendida entre 0,7 μm y 1,4 μm y por modo galería óptico uno modo resultante de la reflexión de rayos luminosos sobre la pared interior de la capa 7 de GaAs que forma microcavidad cilíndrica. Los rayos permanecen confinados a lo largo de la pared y no pasan por el centro de la microcavidad. La generación del modo THz está asegurada por diferencia de frecuencias a partir de los dos modos de galería. La dificultad de la obtención de la generación paramétrica está vinculada a la necesidad de lo que el experto en la técnica denomina el apareo de fases: debido a la dispersión del índice óptico con la longitud de onda, las distintas ondas que interactúan (modos ópticos IR cercano y modo THz) no se desplazan a la misma velocidad en el material. Se desprende que la interacción no lineal se puede convertir rápidamente en destructiva y el proceso pierde su eficacia. Para obtener una generación paramétrica eficaz, es por lo tanto necesario obtener el apareo de fases que asegura el mantenimiento de una interacción constructiva a todo lo largo de la propagación. La geometría cilíndrica del dispositivo 1 permite conseguir el apareo de fases entre los dos modos del microláser y el modo THz a la diferencia de frecuencia. Recientes trabajos, describen por ejemplo en el documento "Whispering-gallery-mode analysis of phase-matched doubly resonant second-harmonic generation" (Y. Dumeige and P. Féron, Phys. Rev. A 74, 063804 (2006)) ponen de
- 50 manifiesto que una elección juiciosa de modos de galería permite realizar un casi-apareo de fases en un microcilindro de GaAs, y obtener potencialmente una interacción no lineal eficaz en el caso del doblaje de frecuencia.

La utilización de una capa activa 7 a base de GaAs presenta ventajas importantes vinculadas a este material:

- Su tecnología muy madura,
- Su fuerte índice óptico,
- Su elevado coeficiente no lineal.

5 Mientras que el primer punto permite realizar dispositivos compactos a bajo coste, el fuerte confinamiento óptico y la elevada no linealidad es susceptible de dar lugar a fuertes rendimientos de conversión.

10 El confinamiento de los dos modos de galería IR cercana está asegurado por la capa activa 7. La geometría cilíndrica de la capa activa 7 asegura un confinamiento vertical de la luz infrarroja cercana ($\lambda \sim 1 \mu\text{m}$) y la reflexión sobre el interfaz semiconductor-aire de esta capa microcilíndrica 7 da nacimiento a modos de galería infrarrojos cercanos. Los modos de galería se caracterizan por su polarización - transversal eléctrico (TE) o transversal magnético TM - y por tres números enteros, que caracterizan su orden vertical (que corresponde al orden del modo siguiendo la dirección vertical del cilindro), radial (que corresponde al orden del modo siguiendo el radio del cilindro) y acimutal. La capa activa 7 no permite en cambio el confinamiento del modo THz.

15 El confinamiento vertical del modo THz está asegurado por los dos espejos superior e inferior 3 y 4. Estos dos espejos metálicos 3 y 4 forman una guía para las ondas electromagnéticas THz y aseguran un confinamiento vertical record del modo THz, según el principio de las guías metálicas plasmónicas para las ondas THz; tal tipo de confinamiento se describe en el documento "Terahertz quantum-cascade laser at $\lambda = 100 \mu\text{m}$ using metal waveguide for mode confinement" (B. S. Williams et al, Appl. Phys. Lett. 83, 2124 (2003)). Este confinamiento permite aumentar la eficacia del rendimiento de conversión no lineal en el marco del dispositivo 1 según la invención. Se tendrá en cuenta que el principio de guía metálica plasmónica se puede también aplicar con un único espejo (en este caso, el confinamiento vertical del modo THz es también de tipo plasmónico pero con un único espejo que autoriza una excitación óptica de los emisores, la presencia de un único espejo arrastrando sin embargo una pérdida en confinamiento del modo THz). La reflexión sobre el interfaz semiconductor-aire del microcilindro 7 conduce a la formación de modos de galería THz. Las capas 6 y 8 de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ permiten alejar el modo guiado de los espejos metálicos 3 y 4 y limitar las pérdidas ópticas por absorción en el metal. Los modos ópticos infrarrojos confinados en la capa activa central de GaAs, tienden en efecto a "babeear" en las capas 6 y 8 de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Por lo tanto, si los espejos metálicos están muy próximos de la capa central, los modos ópticos infrarrojos son susceptibles de ser absorbidos por el metal. El espesor de las capas 6 y 8 de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ se elige, por lo tanto, para minimizar las pérdidas de los modos ópticos infrarrojos. Las capas 6 y 8 desempeñan, por lo tanto, un papel de espaciador entre la capa activa 7 y los espejos 3 y 4. Estas capas 6 y 8, debido a su elevado índice, aseguran por otra parte un confinamiento lateral del modo THz.

35 El corte vertical del dispositivo 1 tal como se ilustra en figura 1c representa una zona semiaislante 14 que corresponde a la parte central de la heteroestructura 2. Esta zona 14 es sensiblemente cilíndrica (concéntrica en el cilindro formado por la heteroestructura 2). Tal como lo veremos más tarde en referencia a la descripción del procedimiento de fabricación, esta zona semiaislante 14 se puede, por ejemplo, obtener por una etapa de implantación iónica. Esta zona 14 permite mejorar los rendimientos del dispositivo 1 según la invención puesto que la corriente del bombeo está entonces eficazmente canalizada en la zona activa del dispositivo 1, es decir, la circunferencia de la capa activa 7 de GaAs que soporta los modos de galería infrarrojos cercanos. Las flechas ilustran el paso de la corriente de bombeo en el seno del dispositivo 1.

40 Según la invención, la misma heteroestructura semiconductor 2 asegura las funciones de fuente láser de bombeo y de conversión de frecuencia. Este enfoque permite potencialmente eliminar todos los problemas de alineación óptica y simplifica enormemente el embalaje del dispositivo 1 según la invención. Consigue un dispositivo 1 emisor de radiación THz extremadamente compacto.

45 Se tendrá en cuenta que es también posible invertir las capas dopadas p y n (i.e. hacer pasar las capas que tienen un dopaje n a nivel superior y las capas que tienen un dopaje p a nivel inferior) sin salir del marco de la invención: las tomas de contacto eléctrico se deberán por supuesto adaptar al tipo de dopaje.

50 Con carácter puramente ilustrativo, se encontrará más abajo un ejemplo de dimensionamiento del dispositivo 1 según la invención: se sabe que la separación espectral entre modos de galería depende del índice efectivo del modo guiado y el diámetro del cilindro. El diámetro se elegirá, por lo tanto, de tal modo que obtenga una emisión THz en la gama espectral deseada, y que realice la condición de el apareo de fases entre los dos modos infrarrojo cercano y el modo THz. Consideremos a título de ejemplo la estructura definida por los siguientes parámetros:

- espesor de la capa guía activa 7 en GaAs: 325 nm;
- composición y espesor de las capas espaciadoras 6 y 8 de confinamiento óptico: $\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{As}$, 2800 nm
- diámetro de la heteroestructura cilíndrica 2: 42 μm

55 En el ejemplo ilustrado más arriba, el cálculo de los modos de galería de la estructura pone de manifiesto que el apareo de fases se obtiene entre los modos infrarrojos cercano $\text{TE}_{0,1,946}$ ($\lambda = 0,917 \mu\text{m}$) y $\text{TE}_{0,1,948}$ ($\lambda = 0,905 \mu\text{m}$), y el modo THz $\text{TM}_{0,1,4}$ ($\lambda = 70 \mu\text{m}$ ó 4,3 THz).

En lo que se refiere a la elección del medio emisor, se tendrá en cuenta que los microláseres de modo de galería que utiliza como emisor uno o varios pozos cuánticos tienden a presentar un comportamiento monomodo para corrientes de inyección claramente superiores a la corriente de umbral. La ampliación de la curva de ganancia del pozo cuántico es en efecto de naturaleza homogénea, lo que permite una competición entre modos por encima del umbral. Los puntos cuánticos aportan aquí una solución potencialmente más potente ya que su curva de ganancia presenta naturalmente una fuerte ampliación no homogénea (60 a 100 meV para puntos de InAs en GaAs), debido a la dispersión en tamaño de los puntos cuánticos. En estas condiciones, varios modos de galería se encuentran en la banda de amplificación del medio activo. El ancho homogéneo de la ganancia, aproximadamente de 10 meV a temperatura ambiente, es claramente más baja que su ancho no homogéneo, lo que permite observar el efecto láser para varios modos de galería.

En términos de rendimientos del dispositivo láser 1 según la invención, la geometría microcilíndro es superior a la de un microdisco ya que permite una buena evacuación del calor hacia el sustrato, asegurando la estabilidad en potencia de las propiedades del láser y que permite alcanzar potencias láser compatibles con la generación no lineal de THz.

La geometría cilíndrica del dispositivo 1 según la invención con emisores en el interior permite conseguir la generación de altas potencias THz en el seno de una fuente compacta. Esta geometría presenta las siguientes ventajas:

- La simetría cilíndrica de la parte central en GaAs favorece el apareo de fases entre los modos ópticos y el modo THz.
- Permite optimizar simultánea e independientemente el confinamiento vertical de los modos de galería ópticos y el del modo THz, jugando sobre los espesores de las distintas capas (especialmente las capas de confinamiento óptico en AlGaAs). Esto permite maximizar el recubrimiento entre los modos ópticos y el modo THz.
- La zona central semiaislante permite una inyección eficaz de los portadores de cargas a la periferia de la capa central de GaAs, que soporta los modos de galería ópticos.
- La geometría cilíndrica permite una buena evacuación del calor hacia el sustrato, que asegura la estabilidad en potencia de las propiedades del láser y que permite alcanzar potencias láser compatibles con la generación no lineal de THz.

Se tendrá en cuenta que una de las especificidades del dispositivo según la invención es integrar un medio emisor alimentado eléctricamente como fuente de un proceso no lineal THz en una microcavidad microcilíndro. La geometría que utiliza los modos de galería descrita en el marco de esta invención permite esta integración. Según la invención, el medio emisor está en el microcilíndro y es esta integración que consigue una fuente THz compacta y potencialmente de bajo coste.

Las figuras 2a a 2f ilustran las distintas etapas del modo de realización del dispositivo 1 según la invención.

La primera etapa representada en figura 2a está constituida por una etapa de crecimiento epitaxial para la obtención de las distintas capas de la heteroestructura semiconductor. La heteroestructura semiconductor se elabora por una técnica de crecimiento convencional, tal como la epitaxia por haces moleculares (EJM) o la epitaxia en fase vapor a partir de compuestos organometálicos (EPVOM). Sobre un sustrato 100 en GaAs (orientado <100>), se deposita una capa tampón no representada en GaAs, típicamente sobre un espesor de 0,5 μm (que sirve para obtener una superficie que presenta una mejor calidad que la superficie del sustrato 100), una capa sacrificatoria 101 de AlAs (0,5 μm), luego las distintas capas semiconductoras tales como se representan en la figura 1b entre los dos espejos metálicos, siguiendo la secuencia:

GaAs-p (no representado)/Al_xGa_{1-x}As-p (referencia 102)/GaAs-nid (referencia 103)/Al_xGa_{1-x}As-n (referencia 104)/GaAs-n (no representado).

El crecimiento de la capa 103 de GaAs no intencionalmente dopada se interrumpe en una o varias ocasiones para insertar los emisores de infrarrojos cercano (pozos cuánticos o planos de puntos cuánticos). La fina capa de GaAs dopada n protege de la oxidación a la capa 104 de Al_xGa_{1-x}As dopada n.

En referencia a la figura 2b, la estructura epitaxial obtenida según la primera etapa se retorna a continuación, se redistribuye por encolado sobre un sustrato huésped 105 previamente metalizado por una capa de metalización 4 (formando esta metalización el espejo inferior). El sustrato huésped 105 es un sustrato buen conductor del calor y de la electricidad, por ejemplo un sustrato metálico o un sustrato de GaAs dopado. El sustrato 100 de GaAs inicial es reducido a continuación por abrasión mecánica, hasta un espesor del orden de 50 μm . Entonces, se elimina el sustrato restante por un ataque químico selectivo, utilizando la capa 102 sacrificatoria de AlAs como capa de detención. Se tendrá en cuenta que la capa tampón de GaAs se elimina al mismo tiempo que el sustrato 100. Por último, la capa 102 sacrificatoria de AlAs se retira por un nuevo ataque químico selectivo que libera la superficie de la capa no representada de GaAs-p en vista de las etapas tecnológicas posteriores. Esta fina capa de GaAs-p protege de la oxidación a la capa 102 de Al_xGa_{1-x}As dopado p subyacente.

La figura 2c ilustra la etapa de supresión de la conductividad de la parte central 14 (que corresponde a la parte central semiaislante de la heteroestructura cilíndrica). Para ello, se realiza un primer nivel de litografía que define en una máscara de resina una abertura de diámetro ligeramente inferior al del cilindro final de la heteroestructura cilíndrica (típicamente 1 a 2 μm al menos). Se realiza entonces una etapa de implantación iónica que hace la zona no protegida semiaislante. Si fuera necesario, se podrá eventualmente utilizar una máscara dura más robusta frente a la implantación iónica. Al final de esta etapa, se eliminan la resina y la eventual máscara dura.

La figura 2d ilustra la etapa de deposición del espejo superior y de definición de la geometría cilíndrica de la heteroestructura. Se realiza para eso un segundo nivel de litografía, alineado con respecto al primero, que permite definir por un modo de tipo "lift-off" el espejo metálico circular superior 3 de diámetro igual al diámetro de la heteroestructura de forma cilíndrica. El espejo metálico superior 3 se utiliza a continuación directamente como máscara de grabado. Esta máscara de grabado 3 puede eventualmente ser reforzado por la deposición de una capa metálica suplementaria, por ejemplo de cromo. La geometría cilíndrica es definida a continuación por grabado iónico reactiva RIE utilizando una mezcla de gases clorados. Se encuentra sobre la figura 2d la heteroestructura semiconductora 2 de geometría cilíndrica que incluye de abajo hacia arriba:

- el espejo inferior 4;
- la fina capa de GaAs dopada n no representada;
- la capa 6 de aleación $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ dopada n;
- la capa activa 7;
- la capa 8 de aleación $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ dopada p;
- la fina capa 9 de GaAs dopada n no representada;
- el espejo superior 3;
- la zona central 14 semiaislante.

La figura 2e ilustra la etapa de toma de contacto sobre el espejo superior 3 que forma electrodo superior; esta etapa se realiza directamente por microsoldadura 12 de un hilo sobre el espejo superior 3. Lo mismo sucede de la toma de contacto sobre el espejo inferior 4 mediante un microsoldadura 112. Se tendrá en cuenta que la microsoldadura se puede también realizar en la cara posterior (directamente sobre el sustrato huésped metálico o semiconductor dopado) tal como se representa en la figura 1c.

La etapa de toma de contacto se puede también realizar de acuerdo con la figura 2f que supone una etapa suplementaria de planarización 113 y de deposición de plots de contacto redistribuidos (etapa de litografía suplementaria).

El procedimiento de fabricación descrito más arriba se adapta a la realización en paralelo de varios dispositivos según la invención, que autoriza la realización de matrices de emisores THz, para aplicaciones de generación THz de alta potencia, o fuentes de selección de frecuencias, dichas fuentes ágiles en frecuencia.

Un ejemplo de fuente 200 ágil en frecuencia está representado en la figura 3. Esta fuente 200 incluye una pluralidad de dispositivo THz según la invención; aquí seis dispositivos 201 a 206 emiten a frecuencias THz diferentes (respectivamente f_1 a f_6) en el seno de esta red de emisores. Los emisores 201 a 206 de frecuencias diferentes son direccionables individualmente (respectivamente mediante medios de control 301 a 306) y permiten por lo tanto la realización de la fuente ágil en frecuencia.

Se tendrá en cuenta que es también posible utilizar varios dispositivos emisores THz según la invención en el seno de una red de emisores en fase: El interés en realizar redes de emisores es doble. En primer lugar, puede ser útil disponer de una matriz de emisores idénticos para aumentar la potencia THz emitida. La puesta en fase de los distintos emisores puede favorecer este aumento. Esta puesta en fase de los distintos emisores se puede obtener de dos maneras diferentes:

- 1) acercando los distintos dispositivos emisores THz según la invención a una fracción de longitud de onda (algunos micrones) unos de otros de manera a acoplar los campos evanescentes THz de los distintos dispositivos.
- 2) utilizando un dispositivo óptico que reinyecta una parte de la radiación THz emitida por la matriz de dispositivos emisores en la propia matriz.

Por supuesto, el dispositivo y el procedimiento según la invención no se limitan a los modos de realización que se acaban de describir a título indicativo y de ninguna manera limitativo en referencia a las figuras 1 a 3.

En particular, la heteroestructura semiconductora de geometría cilíndrica se podría por ejemplo realizar en otra familia de materiales semiconductores III-V o II-VI. Un sistema especialmente interesante es el sistema InGaAsP/InP , muy empleado para realizar microláseres que funcionan a temperatura ambiente, debido a la

relativamente baja eficacia de los mecanismos de recombinación no radiactiva en superficie en este sistema. Se podría por ejemplo emplear una estructura de guía de onda del tipo $\text{InP: n/InGaAsP/InP}$: p, y pozos cuánticos de InGaAs o puntos cuánticos de InAs como medio emisor.

La heteroestructura semiconductor se podrá también modificar de tal modo que optimice el confinamiento óptico del modo guiado infrarrojo cercano, o que facilite la inyección eléctrica en la estructura. Las soluciones tecnológicas desarrolladas para los diodos láseres convencionales, tales como las capas de confinamiento de composición gradual (estructuras GRINSCH) se podrán naturalmente emplear aquí.

Por otra parte, en el modo de realización descrito anteriormente, la guía de onda es monomodo TE y los dos modos infrarrojo cercano incluido en la generación paramétrica son del tipo $\text{TE}_{1,1,m}$ (tal como se menciona más arriba, los dos primeros índices designan el orden del modo según la dirección vertical del cilindro y según su radio, y m designa el orden acimutal del modo). Sin embargo, el cilindro posee otros modos de galería, de índice radial superior que se pueden también explotar. Además, al aumentar el espesor de la capa central de GaAs o la composición de aluminio de las capas de confinamiento de AlGaAs , se puede aumentar el número de modos guiados. Para una guía que tiene k modos guiados TE, el cilindro poseerá k familias de modos de galería del tipo $\{\text{TE}_{n,n,m}\}$ (con n y m fijados, y h número entero comprendido entre 1 y k). La existencia de estas familias de modos de galería suplementarias abre la elección de combinaciones posibles para conseguir el apareo de fases para la generación THz por diferencia de frecuencia.

Tal como ya se explicó en referencia a la figura 1, es muy posible utilizar un único espejo metálico para confinar el modo THz. Se puede entonces sustituir a la otra capa metálica por una capa semiconductor dopada, que tiene también propiedades de dirección de las ondas THz. El interés de esta declinación es que permite evitar la etapa de tecnológica de redistribución de la estructura sobre otro sustrato. Una capa semiconductor dopada entonces se inserta durante el crecimiento (figura 2a), y sustituye finalmente a la capa metálica de la parte inferior de la estructura. La etapa que corresponde a la figura 2b de redistribución sobre otro sustrato se suprime, se conserva el sustrato del crecimiento. El resto del modo de realización es idéntico.

Se tendrá en cuenta también que el dispositivo según la invención descrito hasta ahora permite un bombeo eléctrico del medio activo. Este bombeo puede ser realizado por vía óptica, con un láser. En este caso, las capas dopadas n y p sirven a la estructura semiconductor para la inyección eléctrica de los portadores así como la etapa de implantación iónica no son necesarias. En cambio, la declinación descrita más arriba de sustitución de la capa metálica de la parte inferior por una capa de semiconductor dopado es especialmente interesante en este caso, con una capa semiconductor dopada transparente al bombeo óptico. La integración, por ejemplo por encolado, de este dispositivo según la invención al extremo de una fibra óptica que transporta el haz de bombeo permite obtener una fuente THz compacta, bombeada ópticamente. Tal fuente de final de fibra óptica se puede por ejemplo utilizar para realizar un endoscopio THz para el análisis médico.

El dispositivo según la invención funciona a temperatura ambiente. No obstante, es también posible integrar este dispositivo en un sistema criogénico (en un criostato o sobre una base de tipo enfriador de efecto Peltier). La temperatura se puede emplear como parámetro de control adicional, con el fin de realizar y ajustar sutilmente la condición del apareo de fases. Por otra parte, el funcionamiento a baja temperatura permite disminuir la anchura homogénea de los puntos cuánticos y favorecer un comportamiento mixto del láser. Esto puede permitir utilizar microcavidades más grandes, y en consecuencia modos de galería más cercanos en frecuencia. Al acercarse así las frecuencias láser, se puede, por lo tanto, alcanzar frecuencias THz más bajas. El funcionamiento a baja temperatura puede también permitir mejorar el rendimiento del dispositivo láser (descenso de la corriente del umbral, aumento del rendimiento de conversión eléctrico-óptico).

Hemos encontrado que el medio emisor puede contener uno o varios planos de puntos cuánticos o uno o varios pozos cuánticos. Es también posible utilizar un medio de ganancia en cascada cuántico. Se conoce por el experto en la técnica que los láseres en cascada cuántica presentan también potencialidades de emisión multimodo; a título de ejemplo se demostró en el documento "Evidence of cascaded emission in a dual-wavelength quantum cascade laser" (K. J. Franz et al, Appl. Phys. Lett. 90, 091104 (2007)) un láser de cascada cuántica que emite simultáneamente en dos longitudes de ondas diferentes en el medio infrarrojo sin competición de modo. Se pueden por lo tanto sustituir en la invención los puntos cuánticos o los pozos cuánticos por estructuras de cascada cuántica. Las polarizaciones de las dos ondas láser de cascada cuántica son TM. Para optimizar el coeficiente no lineal, el empleo de una heteroestructura semiconductor que tiene una orientación cristalina diferente (crecimiento sobre una cara (111) de un sustrato de GaAs por ejemplo) puede entonces ser ventajoso.

Finalmente, se distinguen tradicionalmente dos regímenes para una generación paramétrica de luz en cavidad, aquí por diferencia de frecuencia, según que el número medio de fotones en el modo es - o no - superior a 1. En el primer caso, el sistema está en el régimen de oscilación paramétrica, que es favorable para generar fuertes potencias THz. Estos dos regímenes de funcionamiento, que se pueden a priori obtener para una misma estructura según que sea bombeada "débil" o "fuerte", se consideran ambos como conformes a la invención.

REIVINDICACIONES

1.- Dispositivo (1) láser de emisión de onda en una gama de frecuencia comprendida entre 0,5 THz y 5 THz que incluye una heteroestructura semiconductor (2), siendo dicha heteroestructura (2) de forma cilíndrica de sección circular, e incluyendo:

- 5 - una primera capa (7) de material semiconductor ópticamente no lineal que incluye medios emisores (10, 11),
- una segunda capa (8) y una tercera capa (6) de material semiconductor que presenta cada una un índice óptico más bajo que el índice del material utilizado para dicha primera capa (7) y situadas sobre una parte y otra de dicha primera capa (7);

- 10 - al menos una capa metálica (3, 4) situada en un extremo de dicha heteroestructura (2),

caracterizada porque estos medios emisores son aptos para emitir en al menos dos modos de galería ópticos que pertenecen al infrarrojo cercano, estando dichos al menos dos modos de galería confinados en dicha primera capa (7) y que permite la generación en dicha primera capa (7) de una radiación en un modo de galería electromagnético de frecuencia comprendida entre 0,5 THz y 5 THz, denominado modo Terahercios, siendo dicha radiación obtenida por diferencia de las frecuencias de dichos dos modos de galería, asegurando la geometría cilíndrica de dicha heteroestructura el apareo de fases entre los dos modos de galería ópticos que pertenecen al infrarrojo cercano y el modo Terahercios a la diferencia de frecuencia.

- 15 2.- Dispositivo (1) según la reivindicación anterior caracterizado porque dicha heteroestructura (2) de forma cilíndrica incluye una zona central semiaislante (14) que se extiende sensiblemente entre los dos extremos de dicha heteroestructura (2).

3.- Dispositivo (1) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dicho dispositivo (1) incluye dos capas metálicas (3, 4) situadas cada una a un extremo de dicha heteroestructura (2).

4.- Dispositivo (1) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado porque dicha o dichas capas metálicas (3, 4) se realizan en oro.

- 25 5.- Dispositivo (1) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dichos medios emisores se realizan según una de las siguientes formas:

- uno o una pluralidad de pozos cuánticos;
- uno o una pluralidad de planos (10) de puntos de cuánticos (11);
- uno o una pluralidad de estructuras de cascada cuántica.

- 30 6.- Dispositivo (1) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dicho material semiconductor ópticamente no lineal de dicha primera capa (7) es un material III-V tal como el GaAs o InGaAsP o un material II-VI.

7.- Dispositivo (1) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el material semiconductor de dicha segunda y tercera capa (8, 6) es de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ con $0,2 < x < 0,6$ o de InP.

- 35 8.- Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado porque dicha segunda capa (8) semiconductor es una capa dopada p y dicha tercera capa (6) semiconductor es una capa dopada n.

9.- Dispositivo (1) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dicha primera capa (7) incluye una pluralidad de planos (10) de emisores.

- 40 10.- Dispositivo (1) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dicha heteroestructura (2) de forma cilíndrica incluye dos capas semiconductoras (9, 5), recubriendo dichas capas de protección contra la oxidación, respectivamente dicha segunda capa (8) y tercera capa (6).

11.- Dispositivo (1) según la reivindicación anterior, caracterizado porque cada una de dichas capas de protección (9, 5) contra la oxidación tiene un espesor comprendido entre 2 y 10 nm.

- 45 12.- Dispositivo (1) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el espesor de dichas segunda capa (8) y tercera capa (6) está comprendido entre 0,5 y 5 μm .

13.- Dispositivo (1) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque incluye dos contactos eléctricos (12, 13) para la inyección de una corriente de bombeo de dichos medios emisores (10, 11).

14.- Dispositivo (1) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el espesor de dicha primera capa (7) está comprendido entre 200 y 400 nm.

- 15.- Dispositivo (1) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el diámetro de dicha heteroestructura cilíndrica (2) está comprendido entre 30 y 100 μm .
- 16.- Dispositivo (1) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dicha primera capa (7) es una capa no intencionalmente dopada.
- 5 17.- Sistema criogénico que integra un dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16.
- 18.- Red que incluye una pluralidad de dispositivos según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16, caracterizada porque cada uno de dichos dispositivos presenta sensiblemente la misma frecuencia.
- 19.- Red según la reivindicación 18, caracterizada porque dichos dispositivos están suficientemente próximos unos de otros para acoplar los campos evanescentes THz de los distintos dispositivos.
- 10 20.- Red según la reivindicación 18, caracterizada porque se reinyecta una parte de la radiación THz emitida por dicha red en dicha red.
- 21.- Red (200) que incluye una pluralidad de dispositivos (201, 202, 203, 204, 205, 206) según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16, caracterizada porque cada uno de dichos dispositivos (201, 202, 203, 204, 205, 206) presenta frecuencias THz diferentes, siendo cada uno de dichos dispositivos controlado individualmente.
- 15 22.- Procedimiento de realización de un dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque incluye las siguientes etapas:
- Crecimiento epitaxial por deposición sobre un sustrato semiconductor de una estructura que incluye al menos las capas siguientes en este orden a partir del sustrato:
 - o una capa semiconductor sacrificatoria;
 - o una primera capa semiconductor de protección;
 - o una capa realizada de un material semiconductor idéntico al de dicha segunda capa;
 - o una capa realizada de un material semiconductor idéntico al de dicha primera capa, incluyendo dicha capa medios emisores;
 - o una capa realizada de un material semiconductor idéntico al de dicha tercera capa;
 - o una segunda capa semiconductor de protección;
 - Redistribución sobre un sustrato huésped previamente metalizado de dicha estructura epitaxial de modo que la segunda capa de protección esté en contacto con el metal de dicho sustrato huésped;
 - Adelgazamiento de dicho sustrato semiconductor por abrasión mecánica;
 - Ataque químico selectivo de dicho sustrato sobre el espesor restante, siendo dicha capa sacrificatoria utilizada como capa de detención;
 - Ataque químico selectivo de dicha capa sacrificatoria, siendo dicha primera capa de protección utilizada como capa de detención;
 - Realización de una máscara que define una abertura de diámetro inferior al diámetro de la heteroestructura de forma cilíndrica;
 - Implantación iónica que vuelve semiaislante la zona no protegida por dicha máscara;
 - Eliminación de dicha máscara;
 - Deposición de una capa metálica circular de diámetro igual al diámetro de la heteroestructura de forma cilíndrica;
 - Grabado de las partes no recubiertas por dicha capa metálica circular de tal modo a formar la heteroestructura de forma cilíndrica.
- 23.- Procedimiento según la reivindicación anterior, caracterizado porque dicha máscara define una abertura de diámetro inferior de 1 a 2 μm al diámetro de la heteroestructura de forma cilíndrica.

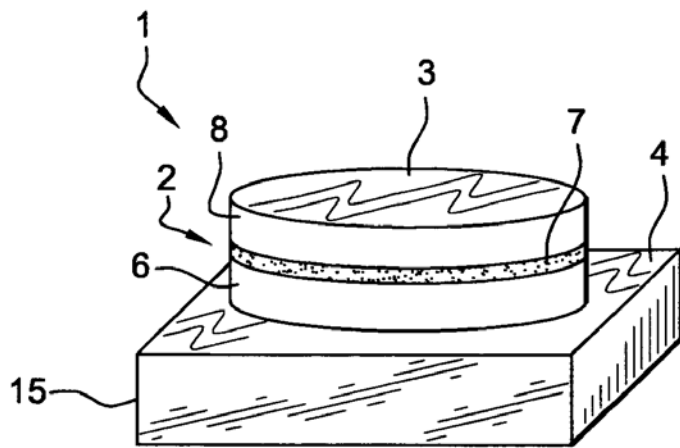


Fig. 1a

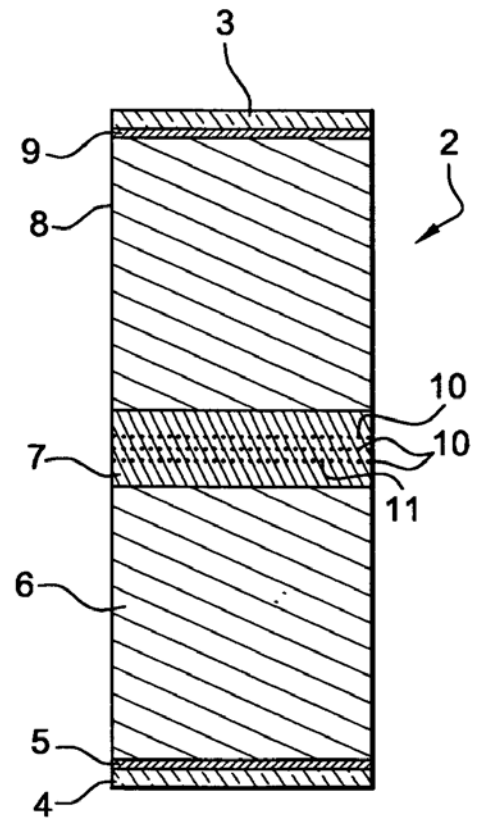


Fig. 1b

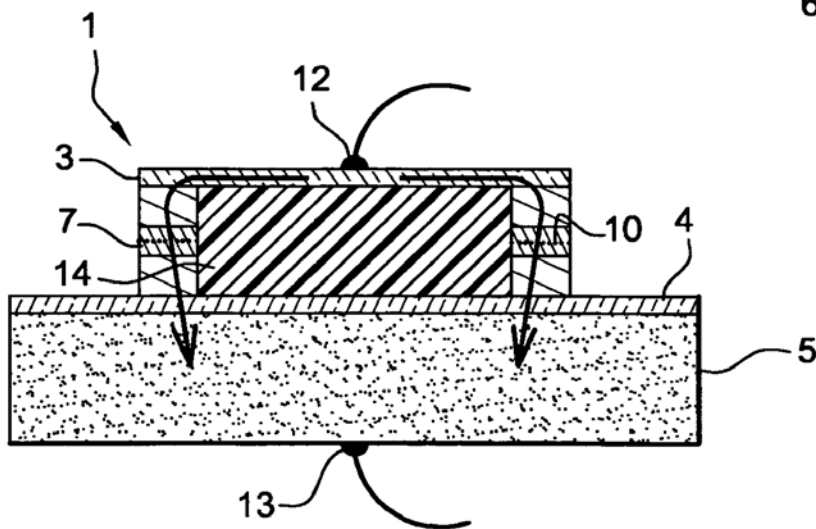


Fig. 1c

Fig. 2a

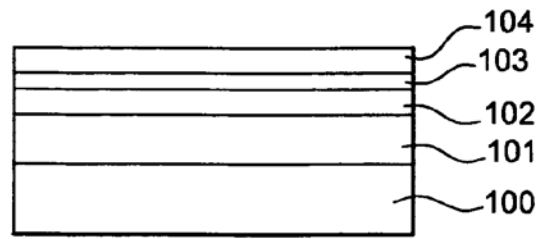


Fig. 2b

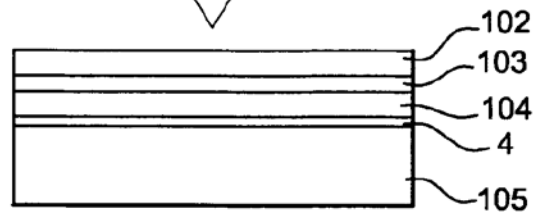


Fig. 2c

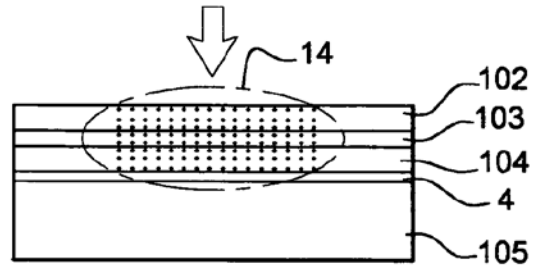


Fig. 2d

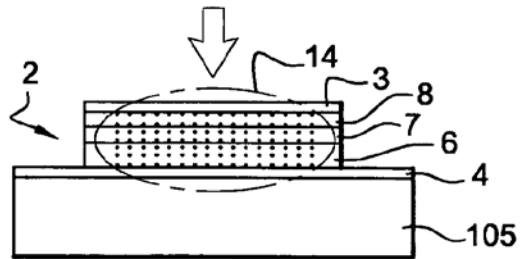


Fig. 2e

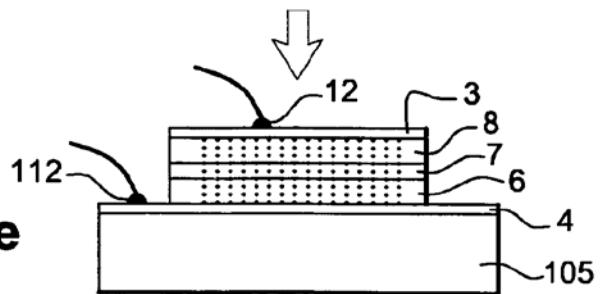
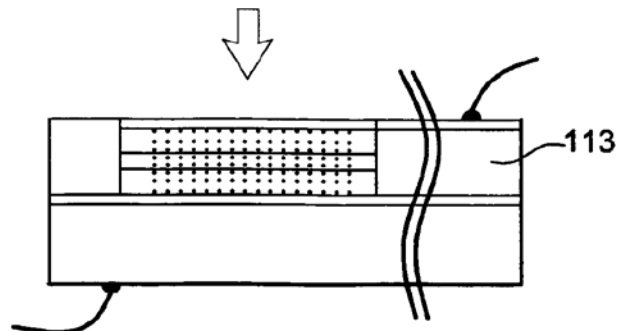


Fig. 2f



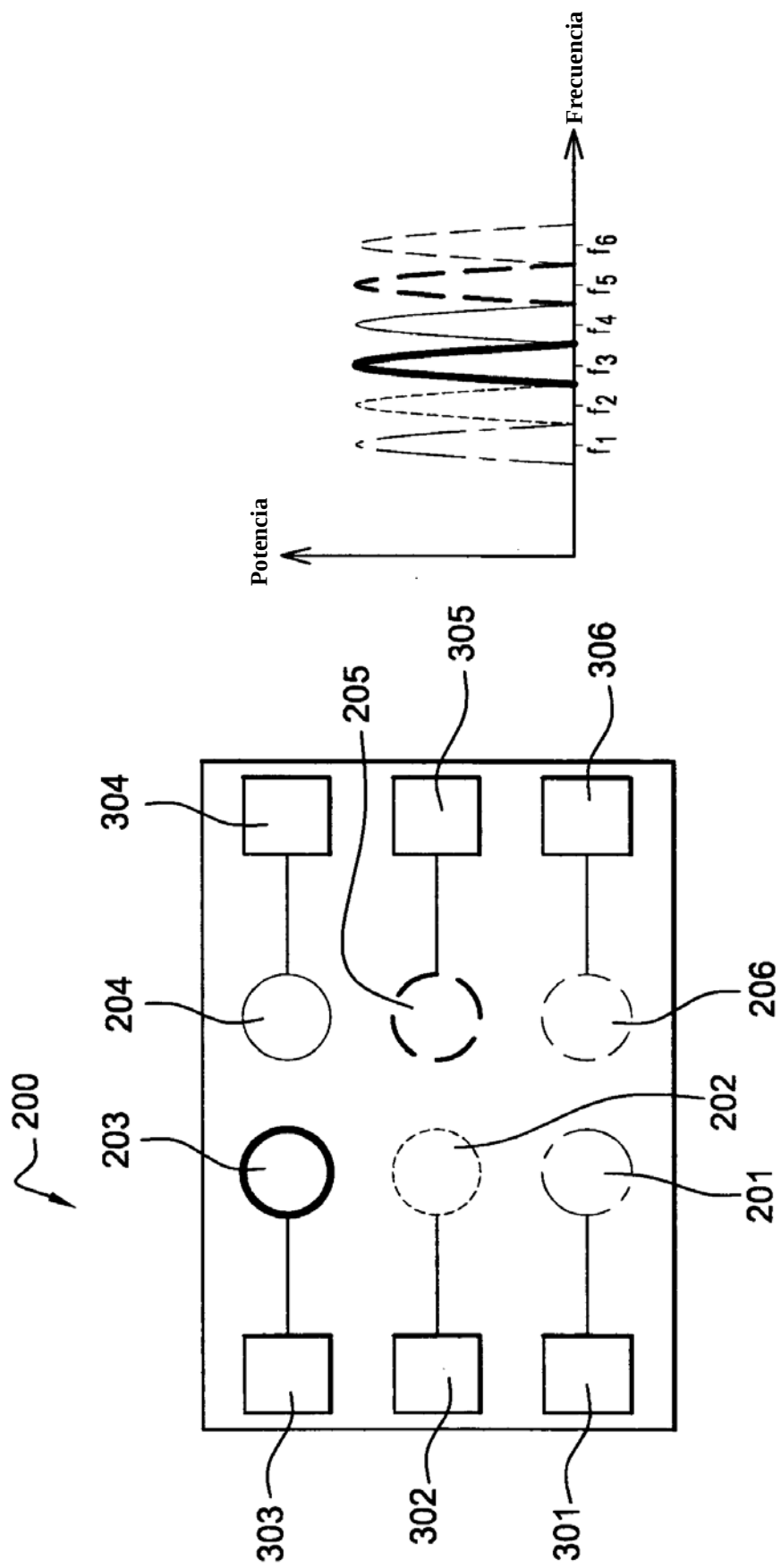


Fig. 3