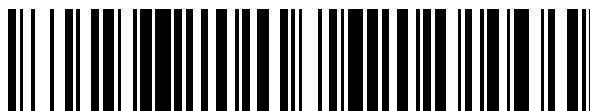


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 559 682**

51 Int. Cl.:

H01Q 13/02 (2006.01)

G01N 22/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.11.2007** **E 07870316 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.10.2015** **EP 2095467**

54 Título: **Antena y emisor/receptor de Terahercios integrados y procedimiento para su fabricación**

30 Prioridad:

21.11.2006 FR 0610164

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
15.02.2016

73 Titular/es:

**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (100.0%)
3, RUE MICHEL ANGE
75016 PARIS, FR**

72 Inventor/es:

**LAMPIN, JEAN-FRANÇOIS FERNAND y
PEYTAVIT, EMILIEN PASCAL**

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 559 682 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

Antena y emisor/receptor de Terahercios integrados y procedimiento para su fabricación

La invención se refiere a una antena integrada para la emisión y/o la recepción de radiación de Terahercios, así como a un dispositivo emisor y/o receptor de radiación de Terahercios que incluye una antena tal y a un procedimiento de fabricación de dicha antena y de dicho dispositivo.

Por radiación de Terahercios se entiende una radiación electromagnética cuya frecuencia está comprendida entre 100 GHz y 3 THz aproximadamente ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz} = 1.000 \text{ GHz}$). En un sentido más restrictivo, la radiación de Terahercios se toma como sinónimo de radiación submilimétrica, es decir, que tiene una longitud de onda comprendida entre $100 \mu\text{m}$ y 1 mm aproximadamente (frecuencia comprendida aproximadamente entre 300 GHz y 3 THz).

La radiación de Terahercios constituye un dominio espectral intermedio entre las microondas y los infrarrojos. Sus aplicaciones, durante mucho tiempo marginales incluso inexistentes, están actualmente en pleno auge. Entre estas aplicaciones, las más importantes son la espectroscopía y la tomografía para la detección de contaminantes, para los controles no destructivos y para el diagnóstico médico. Estas aplicaciones utilizan generalmente una radiación de Terahercios que se propaga en el espacio libre: es por tanto necesario realizar emisores y receptores dotados de una antena.

Las antenas utilizadas generalmente en frecuencias de Terahercios son antenas planas, típicamente de tipo dipolar (dipolo de Hertz), realizadas de manera monolítica sobre el sustrato en el cual son integrados los componentes activos utilizados para la generación o la detección de la radiación y que incluyen una lente semiesférica de silicio dispuesta sobre la cara posterior del sustrato. Tales antenas están descritas específicamente en el documento de patente de EE.UU. US 5,789,750 y en el artículo de G. M. Rebeiz "Millimeter-Wave and Terahertz Integrated Circuit Antennas", Proceedings of the IEEE, Vol. 80, No. 11, página 1748 (1992).

Estos dispositivos presentan numerosos inconvenientes.

En primer lugar, la realización de la lente de silicio y su colocación sobre el sustrato con una precisión del orden de un micrón con respecto a la antena es muy delicada y costosa. Por una parte, la utilización de una lente de acoplamiento es indispensable para evitar que la radiación, principalmente emitida en el sustrato semiconductor, sea atrapada en este último. De hecho, a pesar de la presencia de una lente de ese tipo, solamente el 21% aproximadamente de la potencia emitida por una antena plana tipo es efectivamente irradiada al espacio libre, siendo el resto atrapado y absorbido por el sustrato.

Además, la antena plana más utilizada, la dipolo de Hertz, presenta una eficacia pequeña y que, además, depende fuertemente de la frecuencia. A pesar del hecho de que estas antenas no sean realmente "de banda ancha", han permitido, a día de hoy, obtener los mejores resultados en espectroscopía de Terahercios pulsante. Por el contrario, su mediocre eficacia las hace no adaptarse a la utilización en régimen continuo, donde las potencias en juego son muy débiles.

El documento de patente de EE.UU. US 4,855,749 describe una antena plana de tipo Vivaldi realizada sobre sustrato de silicio, que funciona en el dominio de Terahercios y que no necesita lente de acoplamiento. Los resultados obtenidos con la ayuda de una antena de este tipo no son enteramente satisfactorios, especialmente desde el punto de vista del rendimiento energético y de la dispersión importante de los pulsos.

El documento de patente de EE.UU. US2006/0152412 describe una antena plana que tiene una forma en espiral logarítmica. Una antena de este tipo presenta un rendimiento relativamente bueno y una banda ancha, pero es muy dispersiva. En consecuencia, no es adecuada para una utilización en régimen pulsante.

El artículo de V. Lubecke et al., "Micromachining for Terahertz Applications" IEEE Trans. en Microwave Theory and Tech., Vol 46, No. 11, página 1.821 (1.998), se refiere a antenas integradas para sistemas de Terahercios realizadas con la ayuda de técnicas de la microtecnología y que supera las limitaciones de las estructuras planas. Sin embargo, las soluciones aportadas por estos métodos no son satisfactorias debido a los costes y a la complejidad de los procedimientos de fabricación y a la fragilidad de las estructuras obtenidas. Además, las técnicas utilizadas (grabado profundo, membrana dieléctrica, etc.) son adecuadas esencialmente para el silicio, material que no es especialmente indicado para las aplicaciones de Terahercios.

Un objetivo de la invención es solucionar al menos ciertos inconvenientes de la técnica anterior.

En particular, un objetivo de la invención es proporcionar una antena para la emisión o la recepción de radiación de Terahercios que presente un rendimiento más elevado que las antenas planas utilizadas comúnmente.

Otro objetivo de la invención es proporcionar una antena de Terahercios que sea fácil y económica de fabricar, también en series grandes.

Otro objetivo de la invención es proporcionar una antena de Terahercios de banda muy ancha y poco dispersiva.

Una antena de este tipo puede ser adecuada para una utilización en régimen pulsante con pulsos muy breves (picosegundos), pero igualmente en régimen continuo, eventualmente sintonizable.

Otro objetivo más de la invención es proporcionar un emisor/receptor monolítico para radiación de Terahercios, que integra una antena de ese tipo y al menos un dispositivo de generación y/o detección de radiación.

- 5 Otro objetivo más de la invención es proporcionar un espectrómetro que puede funcionar tanto en régimen pulsante como en régimen continuo, y un analizador de gases basado en un espectrómetro de este tipo.

Al menos uno de estos objetivos se alcanza por una antena integrada para la emisión o la recepción de radiación en un rango de frecuencias comprendido entre 100 GHz y 3 THz, caracterizada por que incluye: un plano de tierra conductor, depositado sobre una superficie denominada superior de un sustrato dieléctrico o semiconductor; una
10 cinta conductora que se extiende por encima de dicho plano de tierra y que forma un ángulo con este último, de manera que se forma una estructura radiante de tipo bocina de onda transversal electromagnética (bocina TEM); y una guía de onda plana que incluye al menos una primera y una segunda bandas conductoras formadas sobre dicha superficie superior del sustrato, conectadas respectivamente a dicha cinta conductora y a dicho plano de tierra conductor.

- 15 Según modos de realización particulares de la invención:

- La anchura de dicha cinta conductora y su distancia a dicho plano de tierra pueden ser variables en una dirección longitudinal, siendo escogida la relación entre dicha anchura y dicha distancia de manera que se realice una adaptación de impedancia entre dicha guía de onda plana y la estructura radiante formada por la cinta y el plano de tierra; más particularmente, esta relación puede mantenerse constante sobre al menos una parte de la anchura de
20 dicha cinta conductora.

Aún más particularmente, la anchura de la cinta conductora y su distancia al plano de tierra pueden aumentar linealmente según dicha dirección longitudinal; dicho de otra manera, dicha cinta conductora puede presentar una forma sensiblemente triangular, con un semiángulo en el pico que está comprendido preferentemente entre 5° y 70°.

El ángulo comprendido entre dicha cinta conductora y dicho plano de tierra está comprendido preferentemente entre 5° y 45°.
25

- Dicha guía de onda plana puede incluir igualmente una tercera banda conductora, igualmente conectada a dicho plano de tierra, estando dispuestas la segunda y la tercera bandas conductoras simétricamente a uno y otro lado de dicha primera banda conductora,

- Dicha cinta conductora que se extiende por encima de dicho plano de tierra y que forma un ángulo con este último puede tener una longitud comprendida entre 100 μm y 10 mm y, preferentemente, entre 500 μm y 5 mm.
30

- La antena puede incluir igualmente al menos una cuña para mantener dicha cinta conductora separada de dicho plano de tierra.

Otro objeto de la invención es un emisor de Terahercios que incluye: una antena tal como la definida arriba; y al menos un dispositivo de generación de una señal electromagnética de frecuencia comprendida entre 100 GHz y 3 THz, integrado sobre el mismo sustrato dieléctrico o semiconductor que la antena; estando dispuesta dicha guía de
35 onda plana para transmitir dicha señal electromagnética del dispositivo de generación a la estructura radiante formada por la cinta y el plano de tierra.

Otro objeto más de la invención es un receptor de Terahercios que incluye: una antena tal como la definida arriba; y al menos un dispositivo de detección de una señal electromagnética de frecuencia comprendida entre 100 GHz y 3 THz, integrado sobre el mismo sustrato dieléctrico o semiconductor que la antena; estando dispuesta dicha guía de
40 onda plana para transmitir dicha señal electromagnética de la estructura radiante formada por la cinta y el plano de tierra al dispositivo de detección.

Otro objeto más de la invención es un espectrómetro de Terahercios que incluye: un emisor de radiación de Terahercios tal como el descrito arriba, del tipo de fotoconducción; un receptor de radiación de Terahercios tal como el descrito arriba, igualmente del tipo de fotoconducción, dispuesto para recibir una radiación de Terahercios generada por dicho emisor, después de que esta última haya atravesado una región que puede contener una muestra a analizar; una primera fuente de láser pulsante; una segunda y una tercera fuentes láser continuas, de las
45 cuales una al menos es sintonizable, pudiendo variar la diferencia de frecuencia de la radiación emitida por dichas segunda y tercera fuentes láser en el interior de un rango comprendido entre 100 GHz y 3 THz; y un montaje óptico para dirigir, de manera selectiva, o bien la radiación emitida por dicha primera fuente láser, o bien una superposición de las radiaciones emitidas por dichas segunda y tercera fuentes láser, sobre zonas fotoconductoras de dichos emisor y detector; incluyendo dicho montaje óptico una línea de retardo para introducir un desfase temporal variable entre los pulsos láser emitidos por dicha primera fuente y dirigidos hacia una zona fotoconductora de dicho emisor, y los pulsos láser igualmente emitidos por dicha primera fuente y dirigidos hacia una zona fotoconductora de dicho
50 receptor.
55

Otro objeto de la invención es un procedimiento de fabricación de una antena tal como la definida arriba que incluye las etapas siguientes:

- 5 - fabricación de un plano de tierra y de una guía de onda plana que presenta al menos dos bandas conductoras, de las cuales una está conectada a dicho plano de tierra, por deposición de una primera capa de metalización (ME) sobre una superficie denominada superior de un sustrato dieléctrico o semiconductor;
- deposición de una capa sacrificial sobre dicho plano de tierra;
- fabricación de una cinta conductora conectada a, al menos, otra banda conductora de dicha guía de onda por deposición de una segunda capa de metalización sobre dicha capa sacrificial; y
- grabado de dicha capa sacrificial para liberar dicha cinta conductora.
- 10 Según modos de realización particulares:
 - El procedimiento puede incluir igualmente, antes de la deposición de dicha capa de metalización, una etapa de realización de aberturas en dicha capa sacrificial para permitir la conexión eléctrica y mecánica entre la cinta conductora y dicha otra banda conductora de dicha guía de onda plana.
 - 15 - Dicha segunda capa de metalización que forma dicha cinta conductora puede presentar un espesor comprendido entre 0,1 μm y 50 μm y, preferentemente, entre 1 μm y 10 μm .
 - El procedimiento puede incluir igualmente una etapa de levantamiento de dicha cinta conductora.
 - El procedimiento puede incluir igualmente una etapa de fabricación de una cuña para mantener dicha cinta conductora separada de dicho plano de tierra. En particular, esta etapa puede incluir la deposición de una gotita de cera en estado líquido entre la cinta conductora y el plano de tierra, y su endurecimiento subsiguiente.
 - 20 - El procedimiento puede incluir igualmente una etapa de integración sobre dicho sustrato dieléctrico o semiconductor de un dispositivo de generación y/o de detección de una señal electromagnética de frecuencia comprendida entre 100 GHz y 3 THz, estando conectado dicho dispositivo a la estructura radiante formada por la cinta y el plano de tierra por dicha guía de onda plana.
- 25 Otras características, detalles y ventajas de la invención se desprenderán de la lectura de la descripción hecha con referencia a los dibujos anexos dados a título de ejemplo y que representan, respectivamente:
 - las figuras 1, 2 y 3, respectivamente, una vista desde arriba, lateral y en planta de una antena integrada según la invención;
 - la figura 4, el esquema de un experimento que demuestra el funcionamiento de una antena y de un dispositivo emisor/receptor según la invención;
 - 30 - las figuras 5 y 6, gráficas que ilustran los resultados de este experimento;
 - las figuras 7A a 7G, las etapas de un procedimiento de fabricación de la antena de las figuras 1 a 3;
 - la figura 8, una vista en sección de una antena según una variante de la invención; y
 - la figura 9, un esquema de principio de un espectrómetro de Terahercios basado en la utilización de antenas según la invención.
- 35 Mientras que las antenas integradas que funcionan en el dominio de Terahercios conocidas de la técnica anterior son principalmente de tipo plano, la invención se refiere a una antena tridimensional realizada sobre un sustrato aislante o semiconductor con la ayuda de técnicas fotolitográficas estándar. Más precisamente, la antena es de tipo bocina de onda transversal electromagnética, es decir constituida por una guía de onda acampanada formada por dos hojas conductoras superpuestas separadas por un ángulo β .
- 40 En el modo de realización representado en las figuras 1 a 3, las dos hojas conductoras que constituyen la bocina de onda transversal electromagnética son un plano de tierra PM, depositado sobre una superficie S de un sustrato aislante o semiconductor SB, y una cinta conductora RC que se extiende por encima de dicho plano de tierra y que forma un ángulo β con éste último. La cinta RC es sensiblemente plana y tiene una forma sensiblemente triangular con un ángulo en el pico 2α . El plano de tierra PM y la cinta RC forman una guía de onda cuya impedancia es constante a lo largo de la dirección longitudinal x y no depende más que de α y β . En el ejemplo considerado,
- 45 $\alpha=23,4^\circ$ y $\beta=9,8^\circ$ para una longitud total de la cinta $L=3$ mm, lo que da una impedancia característica próxima a 50 Ω , una altura total $H=520$ μm y una anchura de extremo de la cinta $W=2,6$ mm.

La impedancia característica puede ser calculada por la fórmula aproximada siguiente, válida para $W>H$ y para un dieléctrico de permitividad igual a 1:

$$Z_c \approx \frac{120\pi}{\frac{W}{H} + 2} = \frac{60\pi}{\frac{\tan \alpha}{\sin \beta} + 1}$$

Esta última fórmula da resultados correctos para ángulos α y β inferiores a 50°. Métodos de cálculo más generales y ábacos pueden ser encontrados en: R.T. Lee et al., IEEE Transaction on antennas and propagation, vol. 52, p. 315 (2.004).

- 5 En principio, los ángulos α y β pueden tomar cualquier valor comprendido entre 0° y 90°, con la exclusión de los valores extremos. Sin embargo, el ángulo α está comprendido preferentemente entre 5° y 70° y el ángulo β entre 5° y 45°.

La longitud de la cinta RC es un parámetro importante ya que determina la frecuencia de corte inferior de la antena. Esta longitud está comprendida generalmente entre 100 μm y 10 mm y, preferentemente, entre 500 μm y 5 mm.

- 10 La frecuencia de corte superior depende de la escala geométrica más pequeña para la cual la antena permanece homotética. Si la cinta RC fuera perfectamente triangular, conectada a la guía de onda plana G por su punta, la anchura de banda sería entonces teóricamente infinita (en la práctica, limitada solamente por las propiedades físicas intrínsecas de los materiales utilizados). En una estructura realizable en la práctica, la frecuencia de corte superior está determinada esencialmente por la anchura acabada de la conexión entre la cinta RC y la guía de onda G.

- 15 La forma de la cinta conductora RC puede no ser triangular, por ejemplo, su anchura W puede depender de manera no lineal de la coordenada longitudinal x. Además, la cinta RC puede no ser plana, sino presentar una curvatura o deformación: como se discutirá más adelante, de hecho, una ligera curvatura es difícilmente evitable debido a las tensiones mecánicas internas acumuladas durante la fabricación del dispositivo. Sin embargo, si se desea obtener una antena de banda ancha, la estructura radiante SR debe ser homotética, es decir, presentar la misma geometría cualquiera que sea la escala a la cual está representada; dicho de otra manera, la relación anchura – altura W(x)/H(x) debe permanecer constante tanto como sea posible. A fin de mantener esta relación W(x)/H(x) sensiblemente constante, y de obtener así un funcionamiento de banda ancha incluso en presencia de una deformación inducida por las tensiones internas, es posible escoger una cinta RC de forma generalmente triangular pero con lados curvilíneos para mantener esta relación W(x)/H(x) sensiblemente constante.

- 25 La cinta RC está realizada en metal altamente conductor (oro, cobre...) con un espesor ε del orden de al menos algunos micrómetros, por ejemplo 5 μm , por razones de resistencia mecánica. La solidez de la estructura puede ser mejorada por brazos o cuñas dieléctricas o incluso metálicas, que mantengan la cinta RC separada del plano de tierra PM. Una técnica particularmente eficaz consiste en estabilizar la cinta con la ayuda de una gotita de cera de parafina fundida: un material de este tipo está adaptado para las aplicaciones de Terahercios debido a las pérdidas débiles que introduce y de su índice de refracción relativamente bajo, del orden de 1,5.

- 30 La estructura radiante formada por la cinta RC y el plano de tierra PM está conectada a una guía de onda plana G formada por tres bandas conductoras: una primera banda BC1 está conectada a la cinta RC y transporta la señal destinada a ser emitida o la señal recibida, mientras que una segunda y una tercera bandas, BC2 y BC3, dispuestas simétricamente a uno y otro lado de la primera banda, están conectadas al plano de tierra PM. De hecho, se puede considerar que la cinta RC es una prolongación de la primera banda BC1 y que el plano de tierra PM está formado por el alargamiento y la unión de la segunda y la tercera bandas. Se comprende que es ventajoso que la impedancia característica de la guía G sea sensiblemente igual a la de la estructura radiante SR, a fin de evitar pérdidas por reflexión a nivel de la transición entre las dos estructuras.

- 35 En el ejemplo considerado, las tres bandas tienen la misma anchura $L_1=L_2=L_3=10 \mu\text{m}$, con una separación $D_{12}=D_{13}$ de 6 μm entre cada una de las bandas laterales BC2, BC3 y la banda central BC1. La anchura total de la guía G debe ser lo más pequeña posible a fin de minimizar las pérdidas por radiación.

- 40 La longitud L_t que separa el punto de separación de la cinta RC de la superficie S y el lado posterior del plano de tierra PM es otro parámetro que debe ser optimizado a fin de minimizar las pérdidas por reflexión a nivel de la transición entre la guía G y la estructura radiante SR. En principio, esta longitud debería ser lo más pequeña posible, de manera compatible con las tensiones de fabricación y la necesidad de evitar cualquier contacto eléctrico directo entre la cinta RC y el plano de tierra PM. En el ejemplo considerado, L_t ha sido escogida, de una manera muy prudente, igual a 20 μm . Mejores resultados pueden ser obtenidos utilizando una longitud de separación de algunos micrómetros, por ejemplo $L_t=5 \mu\text{m}$.

- 45 El sustrato SB está realizado en un material dieléctrico o semiconductor, preferentemente que presenta pérdidas relativamente débiles en el dominio espectral de interés y un índice de refracción lo más bajo posible para minimizar el efecto de atrapamiento de radiación. Ejemplos de sustratos adaptados son AsGa semiaislante (utilizado en el ejemplo de las figuras 4 a 6), Si, IP, SiC, cuarzo, diamante, vidrio, etc. En la práctica, la elección del sustrato está ligada, por un lado, a consideraciones tecnológicas y, por otro lado, a la necesidad de integrar, sobre este mismo sustrato, al menos un elemento activo de generación y/o de detección de radiación de Terahercios. Este elemento

activo puede ser un fotodetector, un fotodiodo, un diodo PIN, de efecto túnel resonante, de contacto Schottky, etc., en cuyo caso el sustrato SB debe ser de tipo semiconductor; puede igualmente tratarse simplemente de una capa delgada de semiconductor polarizado por electrodos metálicos, principalmente en el caso de un generador fotoconductor o de un detector de efecto Franz-Keldysh, en cuyo caso es posible utilizar un sustrato sensiblemente aislante, por ejemplo, de cuarzo o de vidrio.

Un aspecto destacable de la invención es que la radiación se hace directamente en el aire, y no en el sustrato: por esta razón, la utilización de una lente de acoplamiento no es necesaria. Por otro lado, la importancia de las propiedades del sustrato (constante dieléctrica, pérdidas...) es menor que en el caso de los dispositivos de la técnica anterior, lo que deja más margen de maniobra al diseñador para escoger el material más adaptado desde el punto de vista tecnológico y/o para la realización de los elementos activos.

A primera vista, la antena de la invención presenta una semejanza con la descrita en el artículo de J.C. Langer et al, "Micromachined Reconfigurable Out-of-Plane Microstrip Patch Antenna Using Plastic Deformation Magnetic Actuation", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 13, No 3, página 120 (2003). Esta antena presenta una estructura radiante formada por una placa conductora de forma sensiblemente rectangular que se extiende por encima de la superficie superior de un sustrato dieléctrico formando un ángulo con este último, y un plano de tierra conductor depositado sobre la superficie inferior de este mismo sustrato. La placa sobre la superficie superior y el plano de tierra sobre la superficie inferior son de hecho prolongaciones de una línea de transmisión de microbandas que trae las señales a la antena. Esta antena no es, hablando con propiedad, de tipo bocina, sino constituye más bien una variante de una antena de microbandas. Ésta presenta, por este hecho, una banda relativamente estrecha, del orden de 5%, centrada en 25 – 28 GHz, es decir, a frecuencias alejadas de la banda de Terahercios. Por otro lado, como en toda antena de microbandas, el sustrato participa en la radiación, lo que no es molesto en el dominio espectral considerado (ondas centimétricas), pero conduciría a pérdidas muy elevadas y a un efecto pronunciado de guiado de ondas emitidas si se intentase utilizarla para frecuencias de Terahercios.

La figura 4 muestra un esquema de un sistema emisor/receptor monolítico según la invención, del tipo de fotoconducción. Un sistema de ese tipo está constituido por una antena del tipo descrito arriba, un dispositivo activo de generación de radiación de Terahercios GEN y un dispositivo activo de detección de radiación de Terahercios DET, conectados a la estructura radiante SR por medio de la guía de onda plana G. En un experimento demostrativo, el sistema de la figura 4 es utilizado como radar monostático para medir la distancia entre la antena y un objetivo reflectante C situado a algunos milímetros de esta última.

El dispositivo de generación GEN está constituido simplemente por una capa de GaAs creada por crecimiento epitaxial a baja temperatura, depositada sobre las bandas conductoras BC1, BC2 y BC3 de la guía G y polarizada por una tensión continua de 60 V aplicada entre BC1 y BC2/BC3 por un generador eléctrico DCB. En condiciones de equilibrio, la película de GaAs es sensiblemente aislante; un pulso láser LP1 de una duración de 120 fs a 810 nm, generado por un láser Ti:Zafiro la hace conductora por un tiempo del orden de 1 ps, duración de vida de los portadores de carga; esta brusca variación de conductividad engendra un pulso unipolar de corriente eléctrica THz-P igualmente de una duración del orden de 1 ps, que presenta entonces un espectro que se extiende hasta las frecuencias de Terahercios. Este pulso THz-P se propaga a lo largo de la guía G y es irradiado en el espacio libre por la bocina SR. Se observa que, aunque el pulso guiado THz-P sea unipolar, el pulso irradiado THz-P' no lo es, lo que es una consecuencia bien conocida de leyes del electromagnetismo.

El generador GEN está conectado al plano de tierra PM por medio de dos condensadores de base Si_3N_4 (no representados) que interrumpen las bandas P2, P3. En efecto, si se aplica la tensión de polarización directamente entre la cinta CR y el plano de tierra PM, una fuerza electrostática se ejercería entre estos dos elementos, pudiendo inducir su aproximación.

El pulso THz-P' se propaga en el espacio libre hasta el objetivo C, constituido por un plano conductor, que la refleja hacia la antena. La detección del pulso reflejado se hace ópticamente con la ayuda de un detector DET constituido por una capa de $\text{Al}_{0,08}\text{Ga}_{0,92}\text{As}$ depositada sobre las bandas conductoras BC1, BC2 y BC3 de la guía G. Un pulso láser LP2, réplica decaída temporalmente del pulso de generación LP1, es dirigido hacia esta capa y parcialmente reflejada; debido al efecto Franz-Keldysh, el coeficiente de reflexión depende del campo eléctrico instantáneo en el detector, que está dado por la superposición de la tensión continua de polarización y de la señal de Terahercios. Variando el retardo entre los pulsos láser de generación LP1 y de detección LP2, el pulso THz-P' reflejado y captado por la antena es entonces muestreado con una resolución temporal de sub-picosegundo, según el principio bomba-sonda.

Las técnicas de generación y de detección de pulsos de Terahercios utilizadas en este experimento son descritas con más detalle en los artículos siguientes:

J.-F- Lampin et al, "Detection of picosecond electrical pulses using the intrinsic Franz-Keldysh effect", Appl. Phys. Lett. 78, 4103 (2001); y

L. Desplanque et al., "Generation and detection of terahertz pulses using post-processing bonding of low-temperature-grown GaAs and AlGaAs", Appl. Phys. Lett. 82, 2049 (2004).

Como variante, es posible generar una radiación de Terahercios continua. Para hacer esto, se utiliza, en sustitución del pulso láser LP1, dos haces láser continuos, que presentan una diferencia de frecuencia igual a la frecuencia de la radiación a generar. Esta técnica, que explota la sintonización mecánica entre los dos haces láser, se denomina “generación por fotomezclado” y está descrita en el artículo de E. R. Brown, K. A. McIntosh, K. B. Nichols, y C. L. Dennis “Photomixing up to 3.8 THz in low-temperature-grown GaAs” Applied Physics Letters vol. 66, p. 285 (1995).

El fotomezclado puede, igualmente, ser explotado para la detección de la radiación de Terahercios según una técnica denominada detección homodina: véase el artículo de G. Mouret, S. Matton, R. Bocquet, D. Bigourd, F. Hindle, A. Cuisset, J.-F. Lampin y D. Lippens, “Anomalous dispersion measurement in terahertz frequency region by photomixing” Applied Physics Letters vol. 88, 181105 (2006).

Como variante, la radiación de Terahercios continua puede ser detectada con la ayuda de un bolómetro.

La figura 5 muestra la señal de electroabsorción (en unidades arbitrarias a.u.) del pulso de sonda LP2 en función del retardo bomba-sonda (en picosegundos ps). El primer pico P_1 corresponde al pulso eléctrico de Terahercios THz-P conducido directamente por la guía G del generador GEN al detector DET; los picos P_2 y P_3 corresponden a las reflexiones parásitas por la transición G-SR y por el extremo de la bocina, respectivamente, mientras que el pico P_4 corresponde efectivamente al pulso THz-P' emitido, reflejado y detectado. El recuadro muestra un detalle del pico P_4 para dos posiciones del objetivo C, 5,5 mm (línea de puntos) y 7,5 mm (línea continua gris) del extremo de la bocina, y en ausencia de este último (línea continua negra). El tiempo de ascenso sub-picosegundo del pico P_4 (de 10% a 90% en 700 fs aproximadamente) muestra la débil dispersión de la antena según la invención. Este carácter poco dispersivo es característico de antenas de bocina de onda transversal electromagnética.

Dividiendo la transformada de Fourier del pulso reflejado por la del pulso incidente se obtiene el coeficiente de reflexión de la antena en función de la frecuencia, $|S_{11}(f)|$. Como lo muestra la figura 6, este coeficiente de reflexión es inferior a -10 dB sobre una banda que se extiende de 65 GHz a 1.700 GHz (1,7 THz) aproximadamente, que demuestra el funcionamiento de banda ultra-ancha de la antena según la invención.

Las partes atribuibles a la propagación a lo largo de la guía G se estiman en 4 dB para frecuencias hasta 800 GHz y pueden ser reducidas posteriormente escogiendo un sustrato con una permitividad dieléctrica más débil, tal como el cuarzo.

Las figuras 7A a 7G muestran las diferentes etapas de un procedimiento de fabricación de una antena integrada según la invención. En primer lugar, figuras 7A-7B, una primera capa metálica ME es depositada sobre el sustrato SB y gravada por las técnicas clásicas de la microelectrónica a fin de realizar las bandas conductoras BC1-BC3 de la guía G y el plano de tierra PM. A continuación, figura 7C, la capa metálica ME es recubierta por una capa sacrificial de resina fotosensible, en la cual son practicadas aberturas O en correspondencia con futuras conexiones eléctricas y mecánicas entre la cinta conductora RC y la banda conductora central BC1. Una segunda capa metálica ME2, sensiblemente más gruesa que la primera capa ME, es depositada sobre la capa sacrificial SAC (figura 7E) para formar la cinta conductora RC. El espesor ε de la capa ME2 es determinado de manera empírica. En efecto, este espesor debe ser suficiente a la vez para asegurar la solidez mecánica de la cinta RC una vez que esta última ya no está soportada por el sustrato y para evitar que las tensiones internas de la capa ME2 determinen una curvatura demasiado grande de esta última, curvatura que es inversamente proporcional al espesor ε . Al mismo tiempo, un cierto nivel de curvatura resulta indispensable para asegurar la liberación de la antena: una capa ME2 demasiado gruesa se pegaría al plano de tierra e impediría de este hecho el levantamiento de la cinta RC.

Por fin, como se representa en la figura 7F, la cinta RC está liberada por sub-gravado de dicha capa sacrificial SAC. Las tensiones internas precitadas provocan un levantamiento de la cinta RC a parir de su liberación. En general, sin embargo, este levantamiento es insuficiente para alcanzar el ángulo β deseado; es, pues, necesario actuar sobre la cinta RC, por ejemplo con la ayuda de un micromanipulador. De manera opcional, se puede prever una etapa adicional de estabilización de la estructura radiante SR, principalmente disponiendo una gotita de parafina líquida entre el plano de tierra PM y la cinta conductora RC; al solidificarse, esta última forma una cuña dieléctrica CL que rigidiza la antena (figura 7G).

Como variante, como se muestra en la figura 8, la estructura de la antena puede ser mantenida por una plataforma dieléctrica PD, tal como un cubo de PTFE dispuesto entre el plano de tierra PM y la cinta conductora RC y fijado con pegamento o por soldadura; en este último caso, debe preverse un revestimiento metálico RM, RM', por ejemplo de cobre, sobre las superficies superior y/o inferior de la plataforma. Igualmente, en el caso de pegamento, un revestimiento de ese tipo puede ser útil para separar la radiación de Terahercios del pegamento, que será de otro modo susceptible de introducir pérdidas importantes. La utilización de una soldadura BR se muestra particularmente ventajosa: en efecto, cuando el metal fundido solidifica, introduce una tensión mecánica de la cinta conductora RC, que la hace más rectilínea mejorando así las propiedades electromagnéticas de la antena. Igualmente, cuando se utiliza una cuña de este tipo, puede ser útil rellenar de cera el espacio comprendido entre el plano de tierra y la cinta conductora, a fin de homogeneizar la permitividad eléctrica en este espacio.

El o los dispositivos activos de generación y/o detección de radiación de Terahercios pueden ser fabricados al mismo tiempo que la antena, eventualmente con la puesta en común de ciertas etapas del procedimiento de fabricación (principalmente, las etapas de metalización). Como variante, la fabricación de estos dispositivos puede

tener lugar antes o después de la de la antena.

Una de las aplicaciones más prometedoras de la radiación de Terahercios es el análisis espectrométrico, en particular de gases, por ejemplo para identificar contaminantes. En particular, dos técnicas de espectrometría pueden ser utilizadas.

5 Una primera posibilidad consiste en utilizar pulsos de Terahercios breves, y por tanto de banda ancha, para efectuar medidas espectroscópicas por transformada de Fourier. Esta técnica es rápida, pero presenta una resolución espectral baja (típicamente del orden de algunos GHz). Típicamente, para este tipo de aplicación se utilizan antenas de dipolo.

10 Otra posibilidad consiste en utilizar una radiación de Terahercios continua sintonizable obtenida utilizando la técnica del fotomezclado, descrita más arriba. La potencia débil de la radiación de Terahercios así obtenida impone la utilización de antenas espirales o similares. Esta técnica permite efectuar medidas espectroscópicas de alta resolución (algunos MHz), incluso menos, pero el barrido de rangos de frecuencias amplios necesita tiempos grandes.

15 La antena de la invención presenta características electromagnéticas que son adecuadas para la emisión y para la recepción de pulsos de Terahercios, pero también de radiación continua sintonizable. Esto hace posible la realización de un espectrómetro que combina las ventajas de las dos técnicas descritas arriba.

Un espectrómetro de este tipo, cuya estructura está representada esquemáticamente en la figura 9, comprende:

- un emisor de Terahercios EM, por ejemplo del tipo de la figura 4;
- un detector de Terahercios DE que puede ser, también él, del tipo de la figura 4;
- 20 - una celda de análisis CA destinada a contener una muestra (típicamente un gas) a analizar, estando dicha celda dispuesta entre el emisor y el detector;
- una fuente láser pulsante L1;
- dos fuentes láser continuas, L2 y L3, de las cuales una al menos es sintonizable;
- 25 - un montaje óptico para dirigir de manera selectiva una radiación láser generada por dicha fuente láser pulsante, o por dichas fuentes láser continuas, sobre un elemento fotoconductor de dichos emisor y detector de Terahercios. El montaje óptico del detector incluye una línea de retardo LR.

30 Para analizar espectralmente la muestra contenida en la celda CA, se comienza por efectuar una serie de medidas en régimen pulsante. Los pulsos láser engendrados por la fuente L1 sirven tanto para la generación como para la detección de la radiación de Terahercios, como se explicó más arriba, en referencia a la figura 4. La línea de retardo LR introduce una desfase variable entre el pulso de generación y el pulso de detección; efectuando un barrido de este desfase, se puede reconstituir la forma temporal del pulso de Terahercios recibido por el detector DE. Un espectro de banda ancha y baja resolución puede, así, ser calculado por transformada de Fourier.

35 Esta primera fase permite identificar los rangos de frecuencias en donde se sitúan las líneas de absorción que permiten caracterizar la muestra. Las medidas espectroscópicas en continuo se efectúan, entonces, en estas regiones únicamente, utilizando las fuentes láser L2 y L3, para obtener espectros de alta resolución en estos rangos únicamente. Durante esta segunda fase, el desfase temporal introducido por la línea de retardo LR puede ser mantenido fijo.

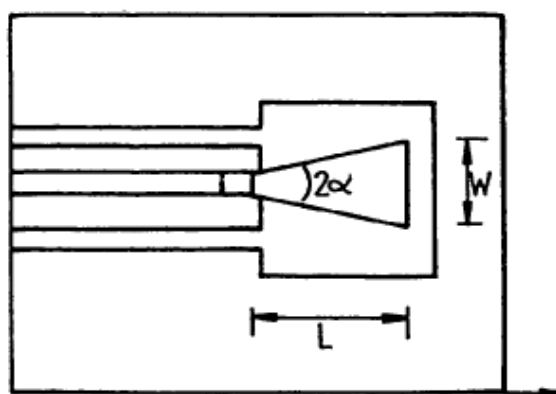
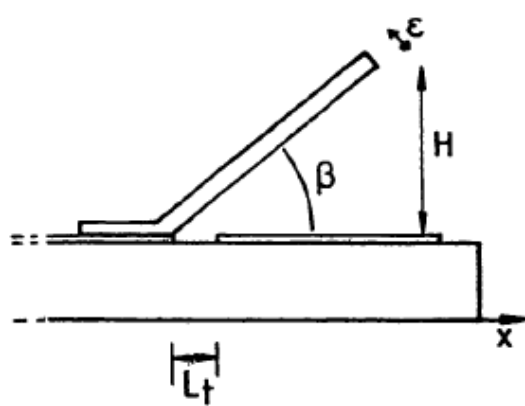
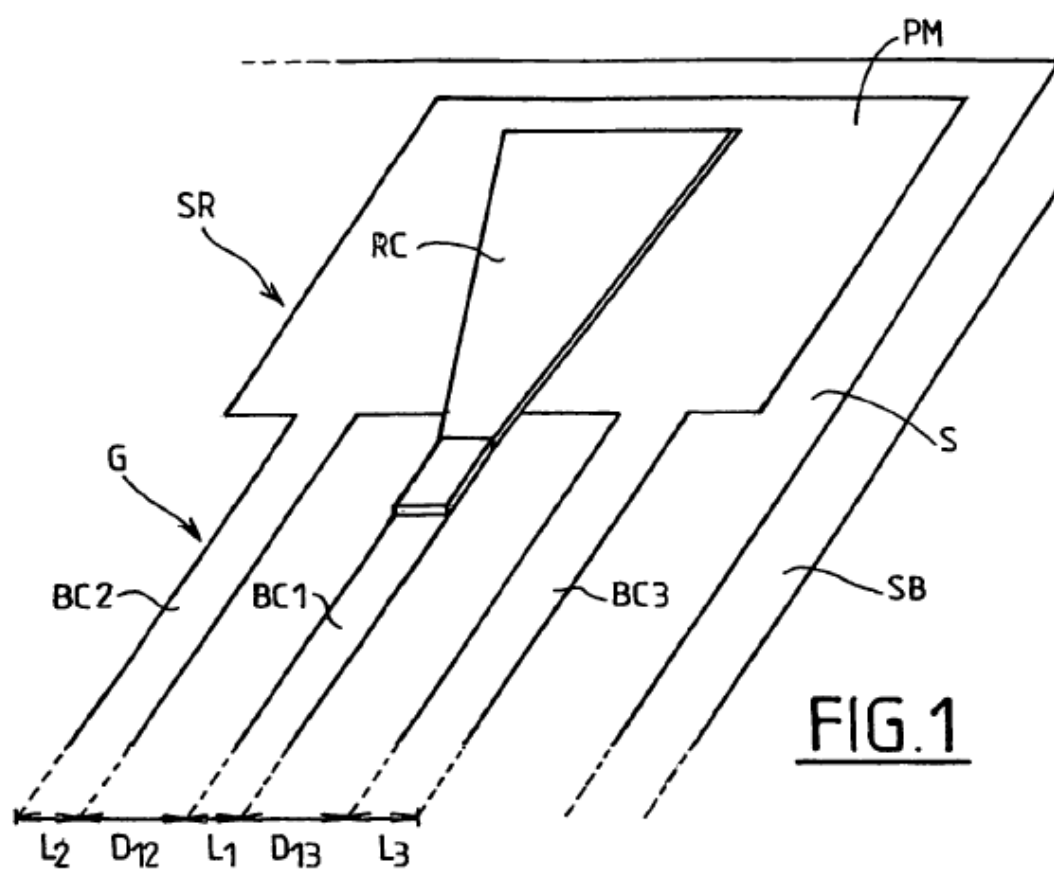
Dicho de otra forma, una primera fase de espectroscopia pulsante de baja resolución permite identificar los rangos de frecuencia "interesantes", después se efectúan adquisiciones de alta resolución en estos rangos.

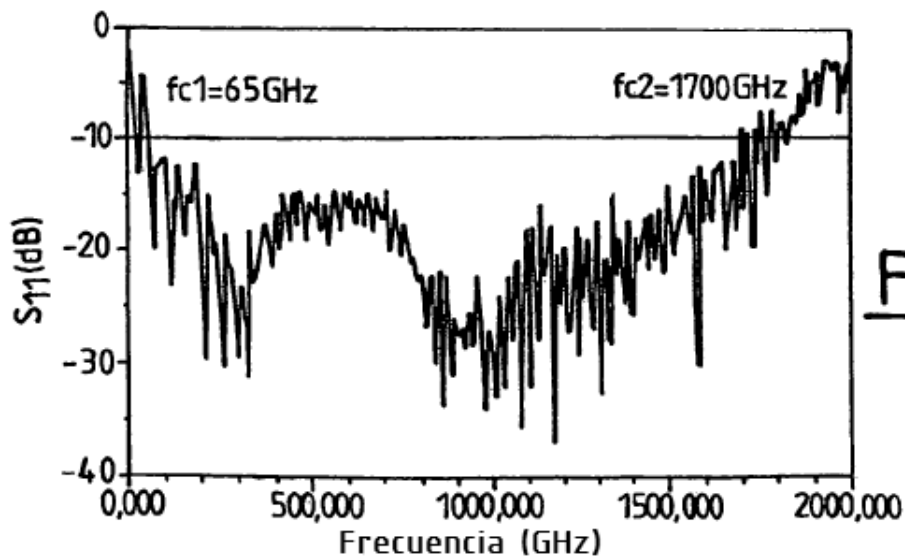
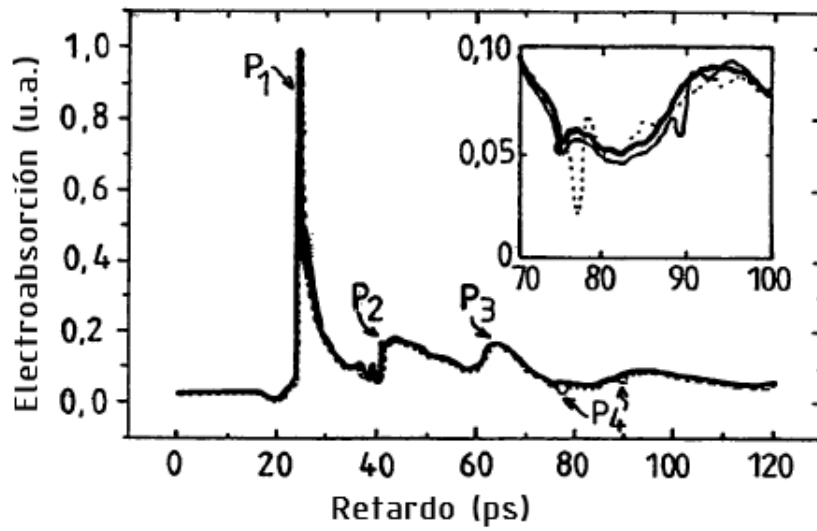
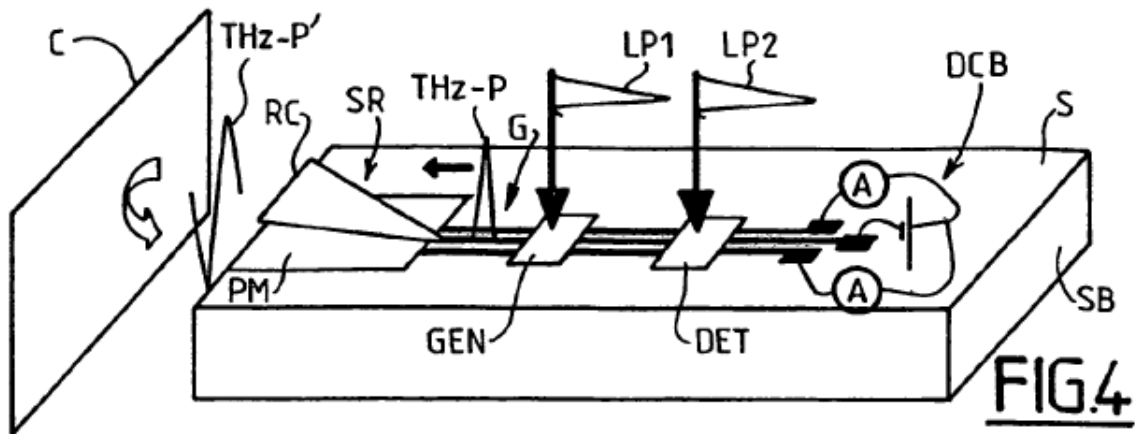
40 Se comprende que la figura 9 no representa más que un solo modo de realización posible de un espectrómetro según la invención. Como variante, se puede concebir el utilizar un mismo dispositivo como emisor y detector, siendo reflejada la radiación de Terahercios por una pantalla dispuesta detrás de la celda CA. Por otro lado, la detección de la radiación durante las medidas en continuo puede hacerse utilizando un bolómetro.

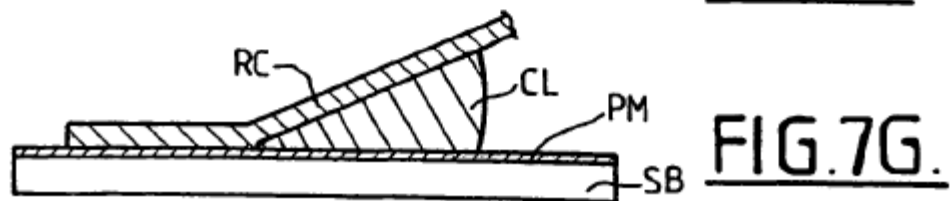
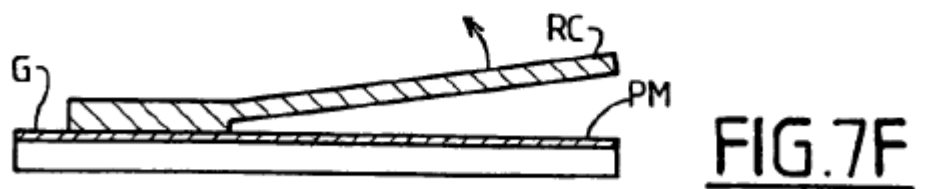
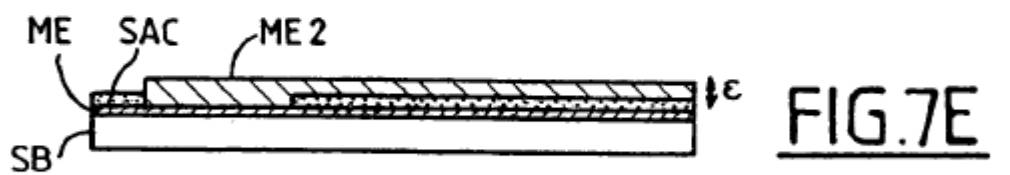
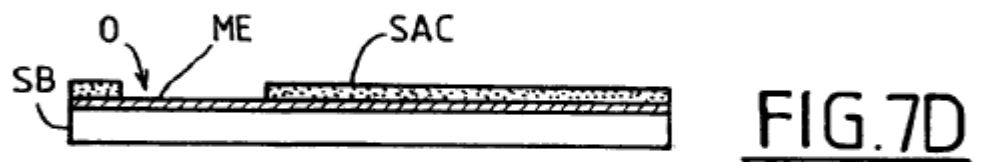
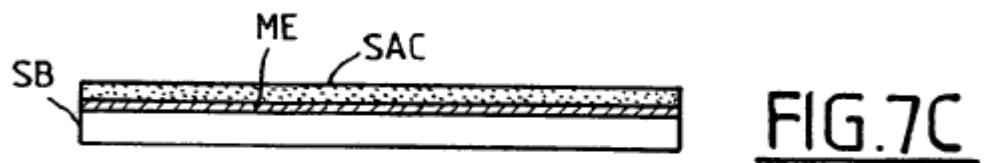
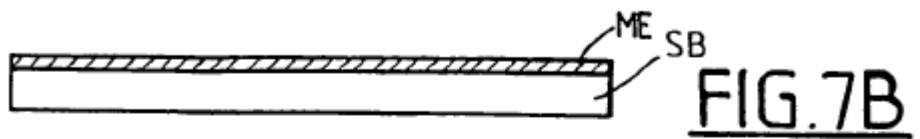
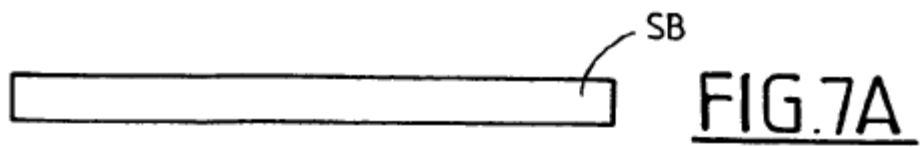
REIVINDICACIONES

1. Antena integrada para la emisión o la recepción de radiación en el rango de frecuencias comprendido entre 100 GHz y 3 THz, caracterizada por que incluye:
 - 5 - un plano de tierra conductor (PM), depositado sobre una superficie (S) denominada superior de un substrato (SB) dieléctrico o semiconductor;
 - una cinta conductora (RC) que se extiende por encima de dicho plano de tierra (PM) y que forma un ángulo (β) con este último, de manera que se forma una estructura radiante (SR) de tipo bocina de onda transversal electromagnética; y
 - 10 - una guía de onda plana (G) que incluye al menos una primera (BC1) y una segunda (BC2) bandas conductoras formadas sobre dicha superficie superior del substrato, conectadas respectivamente a dicha cinta conductora (RC) y a dicho plano de tierra conductor (PM).
2. Antena según la reivindicación 1, en la cual la anchura (W) de dicha cinta conductora (RC) y su distancia (H) a dicho plano de tierra (PM) son variables en una dirección longitudinal (x), siendo escogida la relación entre dicha anchura y dicha distancia de manera que se realice una adaptación de impedancia entre dicha guía de onda plana (G) y la estructura radiante (SR) formada por la cinta y el plano de tierra.
- 15 3. Antena según la reivindicación 2, en la cual la relación entre la anchura (W) de la cinta conductora y su distancia (H) al plano de tierra se mantiene constante sobre al menos una parte de la anchura de dicha cinta conductora.
4. Antena según la reivindicación 3, en la cual la anchura (W) de dicha cinta conductora y su distancia (H) al plano de tierra aumentan linealmente según dicha dirección longitudinal (x).
- 20 5. Antena según una de las reivindicaciones precedentes, en la cual dicha guía de onda plana (G) incluye igualmente una tercera banda conductora (BC3), igualmente conectada a dicho plano de tierra (PM), estando dispuestas la segunda (BC2) y la tercera (BC3) bandas conductoras simétricamente a uno y otro lado de dicha primera (BC1) banda conductora.
- 25 6. Antena según una de las reivindicaciones precedentes, que incluye igualmente al menos una cuña (CL) para mantener dicha cinta conductora separada de dicho plano de tierra.
7. Emisor de Terahercios que incluye:
 - una antena según una de las reivindicaciones precedentes; y
 - al menos un dispositivo (GEN) de generación de una señal electromagnética de frecuencia comprendida entre 100 GHz y 3 THz, integrado sobre el mismo substrato (SB) dieléctrico o semiconductor que la antena;
 - 30 - estando dispuesta dicha guía de onda plana (G) de la antena para transmitir dicha señal electromagnética del dispositivo de generación (GEN) a la estructura radiante (SR) formada por la cinta (RC) y el plano de tierra (PM).
8. Receptor de Terahercios que incluye:
 - una antena según una de las reivindicaciones 1 a 6; y
 - 35 - al menos un dispositivo de detección (DET) de una señal electromagnética de frecuencia comprendida entre 100 GHz y 3 THz, integrado sobre el mismo substrato (SB) dieléctrico o semiconductor que la antena;
 - estando dispuesta dicha guía de onda plana (B) de la antena para transmitir dicha señal electromagnética de la estructura radiante (SR) formada por la cinta (RC) y el plano de tierra (PM) al dispositivo de detección (DET).
9. Espectrómetro de Terahercios que incluye:
 - 40 - un emisor (EM) de radiación de Terahercios según la reivindicación 7, del tipo de fotoconducción;
 - un receptor (DE) de radiación de Terahercios según la reivindicación 8, igualmente del tipo de fotoconducción, dispuesto para recibir una radiación de Terahercios generada por dicho emisor, después de que esta última haya atravesado una región (CA) que puede contener una muestra a analizar;
 - una primera fuente de láser pulsante (L1);
 - 45 - una segunda (L2) y una tercera (L3) fuentes láser continuas, de las cuales una al menos es sintonizable, pudiendo variar la diferencia de frecuencia de la radiación emitida por dichas segunda y tercera fuentes láser en el interior de un rango comprendido entre 100 GHz y 3 THz; y

- un montaje óptico para dirigir, de manera selectiva, o bien la radiación emitida por dicha primera fuente láser (L1), o bien una superposición de las radiaciones emitidas por dichas segunda (L2) y tercera (L3) fuentes láser, sobre zonas fotoconductoras (GEN, DET) de dichos emisor y detector;
- 5 - incluyendo dicho montaje óptico una línea de retardo (LR) para introducir un desfase temporal variable entre los pulsos láser emitidos por dicha primera fuente (L1) y dirigidos hacia una zona fotoconductora (GEN) de dicho emisor (EM), y los pulsos láser igualmente emitidos por dicha primera fuente (L1) y dirigidos hacia una zona fotoconductora (DET) de dicho receptor (DE).
- 10. Procedimiento de fabricación de una antena según una de las reivindicaciones 1 a 6 que incluye las etapas siguientes:
- 10 - fabricación de un plano de tierra (PM) y de una guía de onda plana (G) que presenta al menos dos bandas conductoras, de las cuales una está conectada a dicho plano de tierra, por deposición de una primera capa de metalización (ME) sobre una superficie (S) denominada superior de un sustrato (SB) dieléctrico o semiconductor;
- 15 - deposición de una capa sacrificial (SAC) sobre dicho plano de tierra (PM);
- 15 - fabricación de una cinta conductora (RC) conectada a, al menos, otra banda conductora de dicha guía de onda por deposición de una segunda capa de metalización (ME2) sobre dicha capa sacrificial (SAC); y
- 15 - grabado de dicha capa sacrificial (SAC) para liberar dicha cinta conductora (RC).
- 20 11. Procedimiento según la reivindicación 10 que incluye igualmente, antes de la deposición de dicha capa de metalización (ME), una etapa de realización de aberturas (O) en dicha capa sacrificial (SAC) para permitir la conexión eléctrica y mecánica entre la cinta conductora (RC) y dicha otra banda conductora de dicha guía de onda plana (G).
- 12. Procedimiento según una de las reivindicaciones 10 u 11, que incluye igualmente una etapa de levantamiento de dicha cinta conductora (RC).
- 13. Procedimiento según una de las reivindicaciones 10 a 12, que incluye igualmente una etapa de fabricación de una cuña (CL) para mantener dicha cinta conductora (RC) separada de dicho plano de tierra (PM).
- 25 14. Procedimiento según la reivindicación 13 en el cual dicha etapa fabricación de una cuña (CL) incluye la deposición de una gotita de cera en estado líquido entre la cinta conductora (RC) y el plano de tierra (PM), y su endurecimiento subsiguiente.
- 30 15. Procedimiento según una de las reivindicaciones 10 a 14, que incluye igualmente una etapa de integración sobre dicho sustrato (SB) dieléctrico o semiconductor de un dispositivo de generación (GEN) y/o de detección (DET) de una señal electromagnética de frecuencia comprendida entre 100 GHz y 3 THz, estando conectado dicho dispositivo a la estructura radiante (SR) formada por la cinta (RC) y el plano de tierra (PM) por dicha guía de onda plana (G).







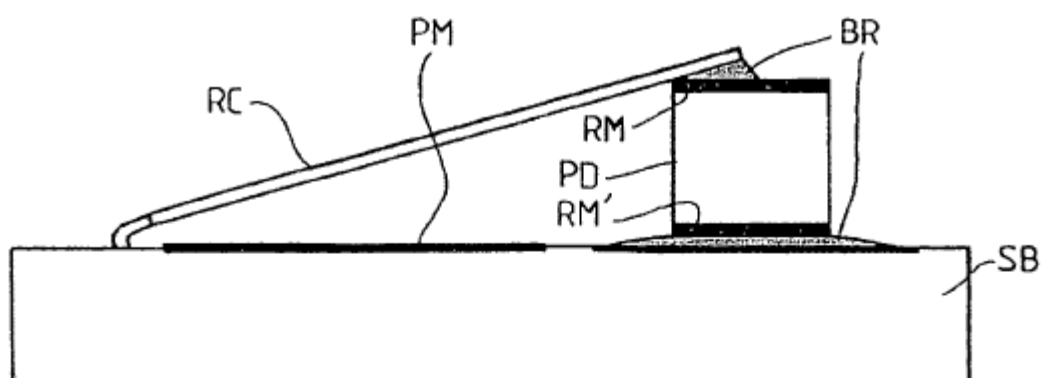


FIG. 8

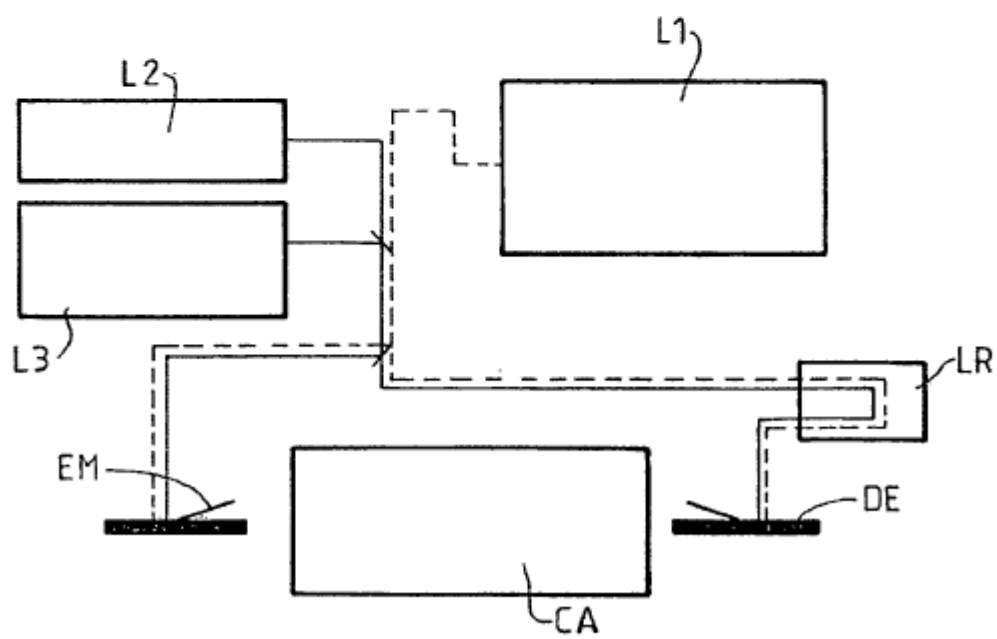


FIG. 9