

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 812 373**

21 Número de solicitud: 201930801

51 Int. Cl.:

**G10K 11/32** (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

**16.09.2019**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**16.03.2021**

Fecha de modificación de las reivindicaciones:

**14.05.2021**

Fecha de concesión:

**22.10.2021**

45 Fecha de publicación de la concesión:

**29.10.2021**

73 Titular/es:

**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES  
CIENTÍFICAS (100.0%)  
CALLE SERRANO Nº 117  
28006 MADRID (Madrid) ES**

72 Inventor/es:

**GÓMEZ ÁLVAREZ-ARENAS, Tomás**

74 Agente/Representante:

**PONS ARIÑO, Ángel**

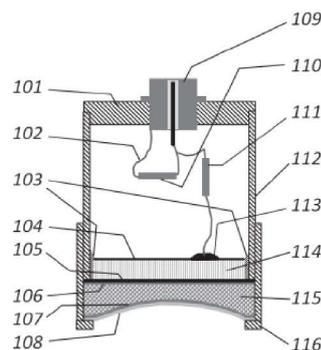
54 Título: **Sistema de enfoque para un emisor, un receptor o un transductor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire**

57 Resumen:

Sistema de enfoque para un emisor, un receptor o un transductor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire.

La presente invención se refiere a un sistema de enfoque caracterizado por comprender una lente cóncava que comprende una zona central plana y un recubrimiento polimérico que recubre la lente, susceptible de ser utilizado como parte de un emisor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire, un receptor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire o un transductor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire que comprende dicho transductor y/o dicho receptor. Además, la presente invención se refiere a dicho emisor, dicho receptor y dicho transductor que comprenden el sistema de enfoque anteriormente mencionado. La presente invención se enmarca en el campo del diseño y la fabricación de transductores ultrasónicos, más concretamente en la fabricación de transductores ultrasónicos, piezoeléctricos, focalizados y acoplados al aire para operar en modo transmisión y recepción.

Fig. 1



ES 2 812 373 B2

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015. Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

## DESCRIPCIÓN

### **Sistema de enfoque para un emisor, un receptor o un transductor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire**

La presente invención se refiere a un sistema de enfoque caracterizado por comprender una  
5 lente cóncava que comprende una zona central plana y un recubrimiento polimérico que  
recubre la lente, susceptible de ser utilizado como parte de un emisor de ultrasonidos  
focalizado y acoplado al aire, un receptor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire o un  
transductor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire que comprende dicho transductor  
y/o dicho receptor. Además, la presente invención se refiere a dicho emisor, dicho receptor y  
10 dicho transductor que comprenden el sistema de enfoque anteriormente mencionado.

La presente invención se enmarca en el campo del diseño y la fabricación de transductores  
ultrasónicos, más concretamente en la fabricación de transductores ultrasónicos,  
piezoeléctricos, focalizados y acoplados al aire para operar en modo transmisión y  
recepción.

### 15 **ANTECEDENTES DE LA INVENCION**

El principal problema en el diseño y desarrollo de transductores piezoeléctricos acoplados al  
aire es la enorme desadaptación de impedancias entre el material piezoeléctrico y el aire.  
Esto da lugar a transductores de sensibilidad muy pobre y con reducido ancho de banda, lo  
cual, limita enormemente la utilidad práctica de esta tecnología. No obstante, es  
20 extremadamente interesante en algunas aplicaciones, mientras que en algunas otras es la  
única alternativa viable.

La razón por la que hay ciertos casos en los que se requiere acoplamiento por aire y no  
técnicas ultrasónicas convencionales basadas en el uso de líquidos acoplantes (agua, gel,  
chorro de agua, etc.), se debe a que hay ciertos materiales y componentes que no pueden  
25 entrar en contacto con dichos líquidos. En estos casos, la única alternativa es la inspección  
con acoplamiento por aire, aunque es extraordinariamente difícil dadas las enormes  
pérdidas que experimenta una señal ultrasónica al atravesar estos componentes y la  
limitada sensibilidad de los transductores empleados convencionalmente.

Entre los componentes y materiales en los que se hace necesario el uso de acoplamiento  
30 por aire se encuentran todos aquellos con cavidades internas, con componentes porosos

(de porosidad abierta) o con elementos susceptibles de ser afectados por líquidos (corrosión, contaminación, dilución, etc.). Un ejemplo son las estructuras sándwich con núcleo de nido de abeja y paredes de polímero reforzado por fibra. Este tipo de componente es muy utilizado en la industria aeronáutica (por ejemplo, en los paneles acústicos que rodean a los turborreactores en aviones comerciales), aeroespacial (estructura de soporte de las antenas), energética (palas de aerogeneradores), ingeniería civil (vigas de material compuesto) y la de material deportivo, ya que combinan rigidez, ligereza, aislamiento térmico y acústico y resistencia a impactos. Sin embargo, y debido a esta estructura multicapa, la inspección de estos componentes mediante acoplamiento por aire es extremadamente difícil y requiere de unos transductores extremadamente sensibles y eficientes, que demanda una adaptación de impedancias de los transductores al aire extremadamente efectiva.

La resolución del problema de desadaptación de impedancias transductor / aire no es sencilla ya que la realización de estos transductores se enfrenta con dos tipos de fuertes restricciones que impiden implementar diseños convencionales empleados en otras aplicaciones. Estas restricciones se refieren a:

- a) Los materiales a emplear: No existen materiales con la impedancia acústica que el diseño ideal requiere emplear. Los materiales disponibles presentan pérdidas que no son despreciables.
- b) El propio montaje / fabricación del transductor: La unión entre los diferentes materiales no es ideal (perfecta cohesión y transición de espesor despreciable). Más aún, en ocasiones es necesario emplear una fina capa (pero no despreciable) de adhesivo.

Los transductores focalizados hacen uso de lentes u otras modificaciones en su estructura para realizar una focalización del haz. Esta focalización permite incrementar la resolución espacial, tanto axial como transversal, lo cual posibilita aplicaciones relacionadas con la obtención de imagen ultrasónica y aplicaciones relacionadas con terapia (actuación sobre el medio insonicado) que requieren mayor precisión espacial. Por lo general, la focalización del haz lleva consigo un aumento de la complejidad del diseño del transductor y una merma de su sensibilidad o eficiencia. Dicha merma de sensibilidad es crítica en el caso de transductores acoplados al aire, que ya padecen una sensibilidad reducida debido al desacoplo de impedancias antes mencionado. Además, como también se ha mencionado anteriormente, el apilamiento de capas de adaptación es crítico para salvar este problema y la presencia de una lente puede resultar una distorsión excesiva.

US4184094 presenta un sistema de focalización para transductores ultrasónicos que permite la transmisión óptima de energía sin desenfocar el haz. No obstante, dicho diseño solo se puede aplicar para transductores acoplados a medios de relativamente alta impedancia (agua, tejidos biológicos, etc.) y no serviría para transductores acoplados al aire  
5 pues en este caso la diferencia de impedancias entre el material piezoeléctrico es mucho mayor y no se dispone de los materiales que serían necesarios para implementar este diseño. Otro sistema de focalización de transductores ultrasónicos que ha sido empleado con éxito en el caso de transductores acoplados al agua y de alta frecuencia ha sido el uso de de arrays anulares de diferentes geometrías (US4138895, US4155259, EP0104929A2),  
10 cuya utilidad para transductores acoplados al aire y de frecuencias intermedias (< 1MHz) es limitado (T. E. Gómez Álvarez-Arenas, J. Camacho, and C. Fritsch, "Passive focusing techniques for piezoelectric air-coupled ultrasonic transducers," *Ultrasonics*, vol. 67, no. January, pp. 85–93, 2016.).

En el caso de los transductores focalizados acoplados al aire, la principal aplicación se refiere a la generación de imágenes ultrasónicas tipo C-scan en el campo de los ensayos no destructivos. El principal objetivo es localizar y dimensionar defectos tipo delaminaciones, inserciones, corrosiones, grietas, pérdida de espesor y/o porosidad, con suficiente resolución.  
15

Para conseguir focalizar un transductor ultrasónico acoplado al aire, se han propuesto estructuras tipo espejo o máscaras de Fresnel (US7719170B1, US8616329B1), que añaden elementos adicionales al transductor y complican su diseño, fabricación y uso. También se han propuesto elementos piezoeléctricos tallados según la geometría del campo (US3732535A), lo cual dificulta y encarece enormemente la fabricación al mismo tiempo que reduce la eficiencia de la vibración del piezoeléctrico, o el uso de lentes específicas para cada aplicación (por ejemplo, en el caso de transductores acoplados al agua: US5577507A).  
25 Asimismo, uno de los problemas conocidos en estos transductores focalizados, viene dado por el uso de lentes embebidas en la estructura del transductor, las cuales afectan a la efectividad de los mismos ya que provocan efectos adversos tales como la des-sintonización y la pérdida de eficacia de las capas de adaptación de impedancias. Estas pérdidas de eficiencia hacen que los diseños actuales no sean útiles para las aplicaciones más exigentes como es el caso de los componentes curvos fabricados con estructuras sándwich asimétricas con núcleo de nido de abeja.  
30

Por lo tanto, es necesario desarrollar nuevos transductores ultrasónicos focalizados acoplados al aire, de alta sensibilidad y resolución espacial, que permita la inspección no destructiva de los materiales y componentes industriales.

## DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

5 El objeto de esta patente se refiere a un sistema de enfoque caracterizado por comprender una lente cóncava que comprende una zona central plana y un recubrimiento polimérico que se extiende por la lente, donde dicho sistema de enfoque es susceptible de ser utilizado como parte de un emisor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire, un receptor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire o un transductor de ultrasonidos focalizado y  
10 acoplado al aire que comprende dicho transductor y dicho receptor. Además, la presente invención se refiere a dicho emisor, dicho receptor y dicho transductor que comprenden el sistema de enfoque anteriormente mencionado y una lámina piezoeléctrica.

El transductor focalizado acoplado al aire de la presente invención exhibe alta sensibilidad y resolución espacial que permite la inspección no destructiva de los materiales y  
15 componentes más exigentes, como las estructuras sándwich mencionadas anteriormente para las que la industria no tiene una solución eficiente. El transductor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire de la presente invención se diseña para que: i) el efecto negativo del sistema de enfoque en la sensibilidad del transductor sea mínimo, ii) para que la transmisión de energía al material que se quiere inspeccionar sea óptima y iii) para que la  
20 resolución espacial sea suficiente para la detección y dimensionado de defectos.

Los transductores piezoeléctricos a los que se refiere la presente invención operan en aire en condiciones normales y en modo emisión-recepción (en inglés modo denominado pitch-catch), dentro del rango de frecuencia de entre 0,1 y 2,0 MHz, con un ancho relativo de banda moderado (>30% @-20dB), con una alta sensibilidad (>-25 dB) y un diámetro del  
25 punto focal (dirección transversal, al haz, caída de 6 dB) menor de 5 mm.

Dichas prestaciones permiten emplear estos transductores para el escaneo y obtención de imagen mediante la técnica de escaneo automatizado de ultrasonidos C-Scan en modo transmisión y empleando acoplamiento por aire para ensayos no destructivos. En particular, permiten emplear estos transductores en este tipo de aplicaciones cuando el componente  
30 bajo inspección presenta pérdidas por transmisión tan elevadas que es imposible emplear otras técnicas disponibles. Se puede citar como ejemplos:

5 1. Estructuras tipo sándwich con pieles de alta impedancia ( $> 3\text{MRayl}$ ) y núcleo muy poroso: tipo “nido de abeja” honeycomb (de aluminio, nomex, etc.) o espuma polimérica; para la detección de defectos por impacto en la superficie, delaminaciones dentro de las pieles, despegados entre la piel y el núcleo, fallas de continuidad en el núcleo, presencia de inserciones bien en las pieles o bien entre la piel y el núcleo.

Nótese que por “estructura tipo sándwich” se entiende en la presente invención una estructura multilaminar compuesta de tres capas. Dos iguales, situadas en las caras externas, también llamadas pieles, y otra interna, entre ambas pieles, también llamada núcleo.

10 2. Mismo objetivo que en (1), con estructuras como en (1), pero con geometría curva.

3. Mismo objetivo que en (1), con estructuras como en (1) o (2), pero con pieles asimétricas o de grosor variable.

4. Mismo objetivo que en (1), con estructuras tipo sándwich con pieles de muy alta impedancia (metales,  $>30\text{MRayl}$ ) y núcleo de goma.

15 5. Medios muy atenuantes, como medios porosos, espumas, sólidos celulares, materiales compuestos con elevada concentración de dispersores (hormigón, compuestos alimenticios, etc.), para determinar presencia de porosidad, grietas, inserciones, etc.

20 Además, el emisor y el receptor pueden ser empleados de forma autónoma cuando únicamente interesa bien la transmisión bien la recepción porque la recepción o la transmisión se resuelven mediante métodos alternativos, respectivamente. Ejemplos de estas aplicaciones son:

- Ensayos no destructivos y/o caracterización de materiales: para la recepción de ondas ultrasónicas generadas en un sólido mediante láser u otras técnicas.
  - Ensayos no destructivos y/o caracterización de materiales, para la generación de ondas que luego son detectadas por otros medios: láser, ultrasonidos con contacto, etc.
  - Generación de ondas o desplazamientos mecánicos en tejidos orgánicos que luego son medidos por láser o cualquier otra técnica, por ejemplo, para aplicaciones en elastografía.
- 25

En un primer aspecto la presente invención se refiere a un sistema de enfoque caracterizado por comprender

- una lente cóncava que presenta una impedancia acústica de entre 0,2 MRayl y 0,9 MRayl y una distancia focal de entre 5 mm y 100 mm y que comprende una superficie cóncava concéntrica con un radio de curvatura de entre 20 mm y 90 mm, y
- un recubrimiento polimérico de espesor de entre 70  $\mu\text{m}$  y 200  $\mu\text{m}$  y de porosidad mayor del 70%, que presenta una impedancia acústica de entre 0,05 MRayl y 0,09 MRayl,

y donde dicho recubrimiento polimérico está dispuesto por toda la superficie cóncava concéntrica de la lente cóncava.

El término "impedancia acústica" se refiere a la propiedad física de un medio material determinada por el producto de la densidad de dicho medio y la velocidad de propagación de los ultrasonidos en dicho medio.

La distancia focal de una lente es un término que se refiere a la distancia desde la superficie de la lente hasta el punto donde la lente concentra la energía.

En la presente invención la lente es cóncava, es decir, viene definida por una superficie cóncava con un radio de curvatura de entre 20 mm y 90 mm.

Por "apertura angular de la lente" se entiende en la presente invención como el ángulo formado por el eje del transductor y la recta que une el borde del transductor con el punto focal. La apertura angular de la lente cóncava de la presente invención debe ser tal que la totalidad del ultrasonido generado sea capaz de atravesar la interfaz aire/sólido a inspeccionar.

En una realización preferida del sistema de enfoque, la superficie cóncava concéntrica de la lente cóncava comprende una zona central plana concéntrica con un diámetro de entre 1 mm y 5 mm y un espesor de entre 0,3 mm y 3,0 mm. Dicha zona central plana debe tener un diámetro igual o inferior al tamaño del foco (diámetro del punto focal) de una lente perfectamente esférica con el mismo radio de curvatura.

En la presente invención, se fabrica la lente cóncava empleando un material con valor de impedancia acústica entre 0,2 MRayl y 0,9 MRayl.

La lente cóncava del sistema de enfoque de la presente invención está hecha de material con un coeficiente de atenuación de ultrasonidos de entre 500 Np/m y 3000 Np/m, preferiblemente menor que 2000 Np/m a una frecuencia de 1 MHz.

Preferiblemente la lente cóncava está hecha de una espuma sintáctica.

5 Se entiende por “espuma sintáctica” como aquella espuma que está compuesta por una matriz polimérica a la que se añaden microesferas huecas de vidrio u otro material de similares características, preferiblemente de tamaño menor que 20  $\mu\text{m}$ , distribuidas de forma aleatoria. Por ejemplo, dichas espumas sintácticas se utilizan en sistemas de flotación para submarinos de aguas profundas, para profundidades de 700 m a 10.000 m.

10 El sistema de enfoque de la presente invención comprende una lente cóncava y un recubrimiento polimérico de espesor de entre 70  $\mu\text{m}$  y 200  $\mu\text{m}$  y de porosidad mayor del 70%. Dicho recubrimiento está dispuesto por toda la superficie cóncava de la lente cóncava. Presenta una impedancia acústica de entre 0,05 MRayl y 0,09 MRayl, un coeficiente de atenuación de ultrasonidos de entre 500 Np/m y 3000 Np/m y está hecho de un polímero  
15 que se selecciona de entre polipropileno, polietersulfona, nilón, nitrato de celulosa o cualquiera de sus combinaciones.

Otro aspecto de la presente invención se refiere a un emisor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire con una frecuencia central comprendida entre 0,1 MHz y 2,0 MHz y una apertura angular de entre 3 ° y 20 ° caracterizado por que comprende

20 

- el sistema de enfoque mencionado anteriormente, donde el espesor de la lente cóncava es igual a un cuarto de la longitud de onda del ultrasonido en la lente a la frecuencia central del emisor.

En una realización preferida del emisor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire con una frecuencia central comprendida entre 0,1 MHz y 2,0 MHz y una apertura angular de entre 3 °  
25 y 20 ° está caracterizado por que comprende

- el sistema de enfoque mencionado anteriormente, donde el espesor de la lente cóncava es igual a un cuarto de la longitud de onda del ultrasonido en la lente a la frecuencia central del emisor,
- una lámina piezoeléctrica seleccionada de entre una cerámica tipo PZT de titanato zirconato de plomo  $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ , un material compuesto de cerámica

30

piezoeléctrica y resina con conectividad tipo 1-3 y con una concentración volumétrica de cerámica de entre el 25% y el 80%, o un monocristal piezoeléctrico tipo  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ , donde dicha lámina piezoeléctrica comprende un recubrimiento conductor eléctrico de oro, plata, carbono, aluminio, cobre o cualquiera de sus combinaciones, donde dicha lámina piezoeléctrica está polarizada a lo largo de su espesor y donde el espesor de dicha lámina piezoeléctrica es de entre 20 nm y 100 nm,

- un equipo electrónico de excitación, y
- una inductancia en paralelo o en serie de entre 1  $\mu\text{H}$  y 500  $\mu\text{H}$  configurada para conectar la lámina piezoeléctrica con el equipo electrónico de excitación y adecuada al mismo,

donde el sistema de enfoque y la lámina piezoeléctrica están en contacto.

Ejemplos comerciales de un equipo electrónico de excitación son PR Olympus 5058, 5072 o 5054, AirScope de DASEL, JSR, etc.

La apertura angular en el emisor está configurada para que la totalidad del ultrasonido generado sea capaz de atravesar la interfaz aire/sólido a inspeccionar.

En otra realización preferida del emisor de la presente invención éste comprende un sistema de enfoque donde la superficie cóncava concéntrica de la lente cóncava comprende una zona central plana concéntrica con un diámetro de entre 1 mm y 5 mm y un espesor de entre 0,3 mm y 3,0 mm y donde el espesor de la zona central plana de la superficie cóncava de la lente cóncava es igual a un cuarto de la longitud de onda del ultrasonido en la lente a la frecuencia central del emisor.

Otro aspecto de la presente invención se refiere a un receptor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire con una frecuencia central comprendida entre 0,1 MHz y 2,0 MHz y una apertura angular de entre 3 ° y 20 ° caracterizado por que comprende

- el sistema de enfoque mencionado anteriormente, donde el espesor de la lente cóncava es igual a un cuarto de la longitud de onda del ultrasonido en la lente a la frecuencia central del receptor,

En una realización preferida del receptor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire con una frecuencia central comprendida entre 0,1 MHz y 2,0 MHz y una apertura angular de entre 3 ° y 20 ° éste está caracterizado por que comprende

- 5           • el sistema de enfoque mencionado anteriormente, donde el espesor de la lente cóncava es igual a un cuarto de la longitud de onda del ultrasonido en la lente a la frecuencia central del receptor,
- 10           • una lámina piezoeléctrica seleccionada de entre una cerámica tipo PZT de titanato zirconato de plomo  $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ , un material compuesto de cerámica piezoeléctrica y resina con conectividad tipo 1-3 y con una concentración volumétrica de cerámica de entre el 25% y el 80%, o un monocristal piezoeléctrico tipo  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ , donde dicha lámina piezoeléctrico comprende un recubrimiento conductor eléctrico de oro, plata, carbono, aluminio, cobre o cualquiera de sus combinaciones, donde dicha lámina piezoeléctrica está polarizada a lo largo de su espesor y donde el espesor de dicha lámina piezoeléctrica es de entre 20 nm y 15           100 nm,
- un equipo electrónico de recepción, y
- una inductancia en paralelo o en serie de entre 1  $\mu\text{H}$  y 500  $\mu\text{H}$  configurada para conectar la lámina piezoeléctrica con el equipo electrónico de recepción

donde el sistema de enfoque y la lámina piezoeléctrica están en contacto.

20           Ejemplos comerciales de un equipo electrónico de recepción son PR Olympus 5058, 5072 o 5054, AirScope de DASEL y JSR.

La apertura angular en el receptor está configurada para que la totalidad del ultrasonido (generado) sea capaz de atravesar la interfaz aire/sólido a inspeccionar.

25           En otra realización preferida del receptor de la presente invención éste se caracteriza por que comprende el sistema de enfoque mencionado anteriormente, donde la superficie cóncava concéntrica de la lente cóncava comprende una zona central plana concéntrica con un diámetro de entre 1 mm y 5 mm y un espesor de entre 0,3 mm y 3,0 mm y donde el espesor de la zona central plana de la superficie cóncava de la lente cóncava es igual a un cuarto de la longitud de onda del ultrasonido en la lente a la frecuencia central del emisor.

30           Otro aspecto de la presente invención se refiere a un transductor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire con una frecuencia central comprendida entre 0,1 MHz y 2,0 MHz y una

apertura angular de entre  $3^\circ$  y  $20^\circ$  caracterizado por que comprende un emisor como el descrito con anterioridad y/o un receptor como el descrito con anterioridad, donde el emisor y el receptor están alineados y enfrentados entre sí y donde la frecuencia central del emisor es distinta a la del receptor.

5

En una realización preferida de la presente invención el transductor de ultrasonidos comprende un emisor como el descrito con anterioridad y un receptor como el descrito con anterioridad, donde el espesor de la lámina piezoeléctrica (114) del receptor es distinto al espesor de la lámina piezoeléctrica (114) del emisor y donde la frecuencia de resonancia mecánica de la lámina piezoeléctrica (114) en el receptor Rx es igual a la frecuencia de resonancia eléctrica de la lámina piezoeléctrica (114) en el emisor Tx y y donde ambas frecuencias se sitúan a la frecuencia central del transductor.

10

A lo largo de la descripción y las reivindicaciones la palabra "comprende" y sus variantes no pretenden excluir otras características técnicas, aditivos, componentes o pasos. Para los expertos en la materia, otros objetos, ventajas y características de la invención se desprenderán en parte de la descripción y en parte de la práctica de la invención. Los siguientes ejemplos y figuras se proporcionan a modo de ilustración, y no se pretende que sean limitativos de la presente invención.

15

## 20 **BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS**

Figura 1: Vista de la sección transversal del transductor de la invención y sus componentes:

Figura 2: Plano de la lente y sus diferentes partes.

Figura 3: Sección transversal y relaciones geométricas presentes en la inspección de un componente con el transductor de la invención: Ilustración de los parámetros implicados en la determinación de la geometría óptima de la lente.

25

Figura 4: Módulo de la impedancia eléctrica de los discos piezoeléctricos empleados para fabricar Tx y Rx

Figura 5: Etapas del montaje del transductor de la invención.

Figura 6: Respuesta de los transductores (señal temporal y banda de sensibilidad en frecuencia) fabricados.

30

**EJEMPLOS**

A continuación, se ilustrará la invención mediante unos ensayos realizados por los inventores, que pone de manifiesto la efectividad del producto de la invención.

5 El ejemplo de realización se refiere a un transductor acoplado al aire, con focalización cuasi-esférica que sirve para la inspección ultrasónica por transmisión con acoplamiento por aire de materiales compuestos con altas pérdidas, concretamente, para la inspección de componentes con estructura tipo sándwich con núcleo de nido de abeja, pieles fabricadas de material de laminado de resina reforzada con fibra de carbono, asimétricas, y geometría no plana, que se emplean habitualmente en la industria aeronáutica y aeroespacial, y que  
 10 deben ser inspeccionados mediante ultrasonidos acoplados al aire porque los ultrasonidos presentan enormes pérdidas por transmisión a través de estas piezas.

La tabla I resume las principales especificaciones del diseño de los transductores para la aplicación.

Tabla I.

Medio de acoplamiento	Aire velocidad ultrasonidos en el aire: $v_M = 342 \text{ m/s}$
Modo de operación	Transmisión: Un transductor emisor y otro receptor
Material a inspeccionar	Resina reforzada por fibra de carbono (CFRP) (velocidad de los ultrasonidos en este material: $V_S = 2700 \text{ m/s}$ )
Tipo de focalización	Cuasi-esférica
Resolución lateral ( $\sigma$ )	< 5.00 mm**
Sensibilidad ( $\Sigma$ )	> -25 dB***

15 \* Cuando el material a inspeccionar es un material multicapa la inspección se lleva a cabo por la cara externa

20 \*\*Se elige una resolución lateral < 5 mm conforme a los requisitos de inspección en la industria aeronáutica de estructuras tipo sándwich con piel de resina reforzada por fibra de carbono (CFRP) y núcleo de panel de abeja.

\*\*\*Se elige una alta sensibilidad > -25 dB (extraordinariamente alta para un transductor con acoplamiento por aire) porque se ha observado que valores inferiores pueden dar lugar a una relación señal ruido muy pobre que no permite la correcta identificación de defectos.

5 La Figura 1 se refiere a los componentes del transductor que se listan a continuación:

- (101) Tapa trasera del casquillo metálico
- (102) Hilo conductor
- (103): Resina para la fijación del elemento (lámina o disco) piezoeléctrico (114) al casquillo (112)
- 10 (104): Metalización de la cara interna del piezo
- (105): Capa conductora (metalización)
- (106): Capa adhesiva
- (107): Capa adhesiva
- (108): Capa cuarto de onda
- 15 (109): Conector trasero
- (110): Inductancia en paralelo
- (111): Inductancia en serie
- (112): Casquillo
- (113): Soldadura del hilo conductor al piezo
- 20 (114): Lámina o disco piezoeléctrico
- (115): Lente
- (116): Corona frontal del casquillo

La lente se diseña de forma específica para conseguir que la transmisión de energía del transductor al aire y del aire al componente a inspeccionar sea máxima. Por lo tanto, la lente se ha diseñado en función del tipo de material a inspeccionar y de la resolución espacial que la aplicación en concreto demanda ( $\sigma$ ).

25

La Figura 2 se refiere a las partes de la lente que se listan a continuación:

- (201) Borde externo de la lente;
- (202) Superficie cóncava de la lente (anillo esférico);
- 30 (203) Sección circular, plana de la lente;
- (204) Grosor de la lente en la zona plana;
- (205) Anchura del anillo plano externo de la lente;
- (206) Diámetro del disco central plano de la lente;
- (207) Diámetro externo de la sección esférica de la lente;
- 35 (208) Diámetro total de la lente.

Los parámetros implicados en la determinación de la geometría óptima de la lente

- (301) Diámetro del disco piezoeléctrico
- (302) Radio del disco piezoeléctrico

(303) Angulo máximo de incidencia de la radicación sobre el material a inspeccionar, que es igual al ángulo límite ( $\theta_{lim}$ )

(304)  $F_a$ : Distancia focal (foco acústico)

(305)  $F_g$ : Radio de curvatura de la lente (foco geométrico)

5 (306)  $\theta_R$ : Ángulo de refracción en la interfase lente/aire;

(307)  $\theta_i$ : Apertura angular nominal

(308) Material en la superficie del componente a inspeccionar (puede ser CFRP),

(309) Material en el núcleo del componente a inspeccionar (puede ser honeycomb).

Adicionalmente, la geometría de dicha lente se ha diseñado de manera que:

- 10 i) la apertura angular del transductor (303) es igual al valor del ángulo límite,  $\theta_{lim}$ , para la transmisión de los ultrasonidos desde el aire al material bajo inspección (por ejemplo,  $\theta_{lim} \sim 9^\circ$  para transmisión de aire a un compuesto de resina reforzada por fibra de carbono como los empleados en el sector aeronáutico, CFRP),
- 15 ii) la distancia focal  $F_a$  (304) está comprendida dentro de la zona de campo próximo del transductor, definida por  $a^2/\lambda$ , donde  $a$  es el radio de la apertura del transductor (302) y  $\lambda$  la longitud de onda en el aire a la frecuencia central del transductor.
- 20 iii) el grosor de la lente en la zona central (204) es igual a un cuarto de onda,  $\lambda/4$  donde  $\lambda$  es la longitud de onda del ultrasonido en la lente a la frecuencia central del transductor ( $f_{cent}$ ).
- iv) la anchura del haz en el punto focal ( $W$ ) correspondiente a un transductor equivalente, pero con focalización perfectamente esférica y radio de curvatura  $F_g$  es menor o igual que la resolución requerida ( $\sigma$ ).

25

$$W = 1.4 \frac{\lambda F_g}{2a} < \sigma$$

- v) El diámetro del disco central plano de la lente (203) es menor o igual que  $\sigma$ .

Adicionalmente, el diseño de dicha lente ha implicado:

- 30 i) el cálculo de los parámetros geométricos de diseño de la lente teniendo en cuenta la refracción que sufre el ultrasonido al pasar de la lente al aire (Figura 3), por lo que el radio de curvatura de la lente, o distancia focal geométrica  $F_g$  (305), no coincide con la distancia focal acústica o real  $F_a$  (304). Así, la distancia focal acústica o real,  $F_a$  (304), y se obtiene a partir del ángulo de refracción a la salida

de la lente en un punto del borde exterior  $\theta_R$  (306). Dicho ángulo se calcula a partir de la ley de Snell en la superficie de la lente y del ángulo de incidencia de la radiación ultrasónica en la superficie de la lente en ese punto:  $\theta_i$  (307):

5 
$$\theta_R = a \sin(v_M/v_L \sin\theta_{lim}) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde  $v_M$  es la velocidad de los ultrasonidos en el medio externo (aire: ~350 m/s) y  $v_L$  la velocidad de los ultrasonidos en la lente (espuma sintáctica ~2500 m/s). Como los ángulos implicados en el problema cumplen la siguiente relación geométrica (ver figura 3):

10 
$$\theta_{lim} + \theta_R = \theta_i \quad (\text{Ecuación 2})$$

Podemos obtener  $\theta_i$ :

15 
$$\tan\theta_i = -v_L/v_M \sin\theta_{lim}/(1.0 - v_L/v_M \cos\theta_{lim}) \quad (\text{Ecuación 3})$$

ii) Además, se ha impuesto que la posición del foco geométrico se sitúe dentro de la zona de campo próximo del transductor:

20 
$$F_g = \delta a^2/\lambda, \text{ donde: } 0 < \delta \leq 1 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Es decir, se determina el valor de  $\delta$ .

Por lo tanto, la apertura del transductor ( $a$ ) se determina según (Ecuación 5):

25 
$$a = 2\sigma/(1.4\delta) \quad (\text{Ecuación 5})$$

Con lo que el radio de curvatura de la lente o foco geométrico  $F_g$  (305) viene dado, finalmente, por:

$$F_g = a/\sin\theta_i \quad (\text{Ecuación 6})$$

30 Se determina la frecuencia mínima del transductor para alcanzar la resolución deseada (Ecuación 6):

$$f_{min} = 1.4v_M / (2\sigma \sin\theta_{lim}) \quad (\text{Ecuación 7})$$

Con los datos de la tabla I, el ángulo límite (303) (incidencia del haz ultrasónico sobre el material a inspeccionar (308)), en este caso es  $\theta_{lim} = 7,44^\circ$

5 Como material piezoeléctrico (114) se emplea un disco de composite 1-3 de PZT5A (60% en volumen) y resina epoxi, polarizado en la dirección del espesor y metalizado en las caras planas (SnCu 200 nm de espesor).

10 La impedancia acústica de este material es:  $Z_P = 17 \text{ MRayl}$ . El material a emplear en la lente (115) debe tener una impedancia  $Z_L = (Z_P Z_{CAE})^{1/2}$ , donde CAE es la capa de adaptación externa (108) para la que se emplea un material con  $Z_{CAE} = 0,07 \text{ MRayl}$ , es decir,  $Z_L \approx 1,09 \text{ MRayl}$ . El material seleccionado en este caso es una espuma sintáctica: un compuesto de resina epoxi cargada con micro esferas huecas de vidrio (concentración 60% en volumen y diámetro de las microesferas 20  $\mu\text{m}$ ). Se fabrica una pastilla de sección circular (diámetro igual a la apertura del transductor) y grosor de 3 mm. La velocidad de propagación de los ultrasonidos en este material es de 2100 m/s y la impedancia acústica de 1,02 MRayl, muy  
15 próxima pues a la requerida.

Se determina que la posición del foco geométrico este a 0,6 x distancia del campo próximo, es decir: se toma  $\delta = 0,6$ .

Con estos parámetros y los valores de tabla I se determinan las especificaciones restantes de los transductores y la lente:

20 Tabla II. Parámetros de diseño del transductor

<b>Parámetros de los transductores</b>	
Frecuencia central	> 378 kHz
Apertura (207)	24 mm
<b>Parámetros de la lente</b>	
Radio de curvatura de la lente (305)	78 mm
Grosor de la lente en el punto central (204)	1,38 mm
Diámetro del disco plano central de la lente	< 5 mm

Dados estos parámetros de diseño, se fabrica un transductor cuya frecuencia central es de 400 kHz. Se emplean dos discos piezoeléctricos del material mencionado, de diámetro 25

mm. Para el transductor emisor se sintoniza la resonancia eléctrica del modo espesor del disco a  $f_{cent} = 400$  kHz (lo que requiere un espesor del disco de 3,92 mm) y para el receptor se sintoniza la resonancia mecánica a  $f_{cent} = 400$  kHz (lo que requiere un espesor del disco de 4,66 mm).

5 Para la capa de adaptación externa (108) se emplea una membrana de polietersulfona fabricada por inversión de fase (precipitación por inmersión) con 140  $\mu\text{m}$  de grosor adecuada como capa de adaptación para este caso ya que presenta una impedancia acústica de  $Z_{CAE} = 0,07$  MRayl y una frecuencia de resonancia ( $\lambda/4$ ) de 400 kHz, sintonizada a la frecuencia central a la que se quiere diseñar el transductor,  $f_{cent}$ , (ver tabla II), donde  
 10 sintonizada quiere decir que la frecuencia de resonancia del modo espesor de la lámina (cuarto de onda o  $\lambda/4$ , donde  $\lambda$  denota la longitud de onda) se toma igual a la frecuencia de resonancia del transductor. Como esta frecuencia en la lámina viene dada por:  $f = v / 4t$ , donde  $v$  es la velocidad de los ultrasonidos en el material con el que se fabrica la lámina y  $t$  el grosor, esto permite, una vez determinado el material a emplear, calcular el grosor  
 15 necesario.

Para verificar que para la apertura (302) seleccionada el modo espesor del disco piezoeléctrico está libre de interferencias con modos radiales y la correcta sintonización de las frecuencias de operación de transductor emisor y receptor, se mide la impedancia eléctrica en un analizador de redes para verificar el suficiente desacoplo entre el modo  
 20 espesor y los modos radiales.

Tabla III. Componentes de los transductores en este ejemplo de realización.

(101) Tapa trasera	Aluminio
(102) Hilo conductor	Cobre
(103) Resina para la fijación del elemento (lámina o disco) piezoeléctrico (114) al casquillo (112)	Resina epoxi
(104) Metalización de la cara interna del piezo;	CuSn, por sputtering
(105) Capa conductora (metalización);	Resina epoxi conductora (cargada con plata)
(106) Capa adhesiva	Cinta adhesiva de doble cara, sin soporte

(107) Capa adhesiva	Cinta adhesiva de doble cara, sin soporte
(108) Recubrimiento polimérico	membrana de polietersulfona fabricada por inversión de fase (precipitación por inmersión) con 140 $\mu\text{m}$ de grosor adecuada como capa de adaptación para este caso ya que presenta una impedancia acústica de $Z_{\text{CAE}} = 0,07 \text{ MRayl}$ y una frecuencia de resonancia ( $\lambda/4$ ) de 400 kHz
(109) Conector trasero	Coaxial, BNC hembra de panel
(110) Inductancia en paralelo	Tx: 47 $\mu\text{H}$  Rx: 470 $\mu\text{H}$
(111) Inductancia en serie	Ninguna
(112) Casquillo	Cilindrico, de aluminio, grosor de pared: 1mm, diámetro interior 26 mm.
(113) Soldadura del hilo conductor al piezo	Estaño
(114) Lámina o disco piezoeléctrico	disco de composite 1-3 de PZT5A (60% en volumen) y resina epoxi, polarizado en la dirección del espesor y metalizado en las caras planas (SnCu 200 nm de espesor.  Diámetro 25 mm. Para el transductor emisor se sintoniza la resonancia eléctrica del modo espesor del disco a $f_{\text{cent}} = 400 \text{ kHz}$ (lo que requiere un espesor del disco de 3,92 mm) y para el receptor se sintoniza la resonancia mecánica a $f_{\text{cent}} = 400 \text{ kHz}$ (lo que requiere un espesor del disco de 4,66 mm).
(115) Lente	Espuma sintáctica: un compuesto de resina epoxi cargada con micro esferas huecas de vidrio (concentración 60% en volumen y diámetro de las microesferas 20 $\mu\text{m}$ ). La velocidad de propagación de los ultrasonidos en este material es de 2100 m/s y la impedancia acústica de 1,02 MRayl.  Se tornea a partir de una pastilla de sección circular

	(diámetro igual a la apertura del transductor) y grosor de 3 mm.  Ver tabla II para los parámetros de la lente
(116) Corona frontal del casquillo	Aluminio.

La figura 6 muestra la respuesta de los dos transductores así fabricados. Separación: 140 mm, Excitación: Pulser/Receiver de Olympus, modelo 5077, Excitación de 100 V. Receptor conectado directamente a un osciloscopio digital para representar la señal recibida (Tektronix DPO7054).

5 Procedimiento de fabricación:

*(1) Procedimiento para la verificación inicial de los discos piezoeléctricos y su correcta sintonización por medida de impedancia eléctrica.*

Se comprueba la integridad y correcta sintonización de los discos piezoeléctricos mediante la medida de su impedancia eléctrica en un analizador de impedancias o un analizador de redes en el entorno de la frecuencia de resonancia del modo espesor proporcionada, en este caso 0,4 MHz. Para medir la impedancia eléctrica del disco se conectan las caras metalizadas a los bornes de salida del analizador de impedancias. Se verifica que la resonancia eléctrica de Tx y la resonancia mecánica de Rx se encuentran en 0,4 MHz (tolerancia 10%). Esta será la frecuencia central del transductor a fabricar. Se verifica la influencia casi despreciable de los modos radiales de vibración.

La Figura 4 muestra el módulo de la impedancia eléctrica (ohm) de los discos de composite piezoeléctrico empleados para construir Tx y Rx, frente a la frecuencia (MHz) y medido en el entorno de la frecuencia de resonancia (0,4 MHz). Como se ha mencionado, en primer lugar, se verifica que la frecuencia de la resonancia eléctrica de Tx coincide con la frecuencia de resonancia mecánica de Rx y ambas se sitúan en la frecuencia a la que se quiere diseñar el transductor (400 kHz). En segundo lugar, se verifica que las oscilaciones que se observan a baja frecuencia, que corresponden a los modos radiales en el disco, prácticamente no interfieren con modo espesor que aparece a 0,4 MHz.

*(2) Fabricación de la lente.*

Para fabricar la lente puede emplearse cualquier método conocido. En particular, al tratarse de una espuma sintáctica, constituida por resina epoxi y microesferas de vidrio hueco, es posible hacer la mezcla de ambos componentes con la resina en estado líquido y verter en un molde que reproduce la geometría de la lente. Alternativamente, es posible fabricar una pastilla y a partir de ella tallar la geometría de la lente calculada (tabla II: *radio de curvatura de la lente, grosor de la lente en el punto central y diámetro del disco plano central de la lente*) empleando un torno con control numérico. En este caso se ha empleado esta segunda opción.

(3) *Montaje del transductor.*

10 El proceso de montaje del transductor se esquematiza en la figura 5.

(502) Lámina de plástico de soporte para el montaje del disco piezoeléctrico (114) al casquillo (112);

15 (503) Cinta adhesiva de doble cara para fijar disco piezoeléctrico (114) y casquillo (112) a la lámina (502)

a) Se suelda un hilo conductor (102) al disco piezoeléctrico empleando estaño y pasta para soldar (113). Se aplica un agente demoldeante a la otra cara del disco piezoeléctrico. Se toma una lámina de plástico (policarbonato 200  $\mu\text{m}$ , 30 x 30 mm) (502) y se pega cinta adhesiva de doble cara (503) sobre ella. Esto hará de soporte para la fijación del disco piezoeléctrico al casquillo. Se pega el disco piezoeléctrico a esta lámina por la cara sobre la que se aplicó el demoldeante.

20 b) Se pega el casquillo metálico (112) al film de plástico (502) de forma concéntrica al disco piezoeléctrico, asegurando la estanqueidad de la cavidad formada por casquillo, disco piezoeléctrico y lámina de policarbonato. Se rellena el borde entre el casquillo y el disco piezoeléctrico (ancho de 1 mm en el presente ejemplo) con resina epoxi (103).

25 c) Una vez curada la resina (103), se retira el film (502), se limpia la superficie del disco piezoeléctrico y del casquillo y se cubre la superficie frontal con una delgada capa (100  $\mu\text{m}$ ) de resina conductora (105). Se verifica la conductividad eléctrica entre la superficie que se acaba de metalizar y el casquillo metálico del transductor

30 d) Se pega la lente (104) a (105) empleando una capa de adhesivo de uretano de 100  $\mu\text{m}$  (106).

e) Se pega la capa de adaptación cuarto de onda de membrana polimérica (107) a la lente empleando cinta adhesiva de doble cara (108).

- f) Se fija la corona frontal (116) al borde del casquillo empleando adhesivo de uretano.  
Se suelda la inductancia serie (111) al hilo conductor (102)
- g) Se suelda la inductancia paralelo (110) al conector BNC (109) alojado en la tapa trasera (101)
- 5 h) Se fija la tapa al casquillo empleando resina epoxi conductora.

Se deja curar la resina depositada entre el casquillo y el disco piezoeléctrico.

## REIVINDICACIONES

1.- Un sistema de enfoque caracterizado por comprender

- una lente cóncava (115) que presenta una impedancia acústica de entre 0,2 MRayl y 0,9 MRayl y una distancia focal de entre 5 mm y 100 mm que comprende una superficie cóncava concéntrica con un radio de curvatura de entre 20 mm y 90 mm, y
- un recubrimiento polimérico (108) de espesor de entre 70  $\mu\text{m}$  y 200  $\mu\text{m}$  y de porosidad mayor del 70%, que presenta una impedancia acústica de entre 0,05 MRayl y 0,09 MRayl,

y donde dicho recubrimiento polimérico (108) está dispuesto por toda la superficie cóncava concéntrica de la lente cóncava (115).

2. El sistema de enfoque según la reivindicación 1, donde la superficie cóncava concéntrica de la lente cóncava (115) comprende una zona central plana concéntrica con un diámetro de entre 1 mm y 5 mm y un espesor de entre 0,3 mm y 3,0 mm.

3. El sistema de enfoque según cualquiera de las reivindicaciones 1 ó 2, donde lente cóncava está hecha por una espuma sintáctica.

4. El sistema de enfoque según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, donde el recubrimiento comprende un polímero seleccionado de entre polipropileno, polietersulfona, nilón, nitrato de celulosa o cualquiera de sus combinaciones.

5. Un emisor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire con una frecuencia central comprendida entre 0,1 MHz y 2,0 MHz y una apertura angular de entre 3 ° y 20 ° caracterizado por que comprende

- el sistema de enfoque según las reivindicaciones 1 a 4, donde el espesor de la lente cóncava (115) es igual a un cuarto de la longitud de onda del ultrasonido en la lente a la frecuencia central del emisor.

6. El emisor según la reivindicación 5 caracterizado por que además comprende una lámina piezoeléctrica (114) seleccionada de entre una cerámica tipo PZT de titanato zirconato de plomo  $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ , un material compuesto de cerámica piezoeléctrica y resina con conectividad tipo 1-3 y con una concentración volumétrica de cerámica de entre el 25% y el 80%, o un monocristal piezoeléctrico tipo  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ , donde dicha lámina

piezoeléctrica (114) comprende un recubrimiento conductor eléctrico de oro, plata, carbono, aluminio, cobre o cualquiera de sus combinaciones, donde dicha lámina piezoeléctrica (114) está polarizada a lo largo de su espesor y donde el espesor de dicha lámina piezoeléctrica (114) es de entre 20 nm y 100 nm,

- 5
- un equipo electrónico de excitación, y
  - una inductancia (110) en paralelo o en serie de entre 1  $\mu$ H y 500  $\mu$ H configurada para conectar la lámina piezoeléctrica (114) con el equipo electrónico de excitación.

donde el sistema de enfoque y la lámina piezoeléctrica (114) están en contacto.

10 7. El emisor según cualquiera de las reivindicaciones 5 ó 6 que comprende un sistema de enfoque según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 4, donde el espesor de la zona central plana de la superficie cóncava de la lente cóncava (115) es igual a un cuarto de la longitud de onda del ultrasonido en la lente a la frecuencia central del emisor.

15 8. Receptor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire con una frecuencia central comprendida entre 0,1 MHz y 2,0 MHz y una apertura angular de entre 3 ° y 20 ° caracterizado por que comprende

- el sistema de enfoque según las reivindicaciones 1 a 4, donde el espesor de la lente cóncava (115) es igual a un cuarto de la longitud de onda del ultrasonido en la lente a la frecuencia central del receptor.

20 9. El receptor según la reivindicación 8, caracterizado por que además comprende

- una lámina piezoeléctrica (114) seleccionada de entre una cerámica tipo PZT de titanato zirconato de plomo  $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ , un material compuesto de cerámica piezoeléctrica y resina con conectividad tipo 1-3 y con una concentración volumétrica de cerámica de entre el 25% y el 80%, o un monocristal piezoeléctrico tipo  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ , donde dicha lámina piezoeléctrica (114) comprende un recubrimiento conductor eléctrico de oro, plata, carbono, aluminio, cobre o cualquiera de sus combinaciones, donde dicha lámina piezoeléctrica está polarizada a lo largo de su espesor y donde el espesor de dicha lámina piezoeléctrica es de entre 20 nm y 100 nm, un equipo electrónico de recepción, y
  - una inductancia (110) en paralelo o en serie de entre 1  $\mu$ H y 500  $\mu$ H configurada para conectar la lámina piezoeléctrica (114) con el equipo electrónico de recepción.
- 25
- 30

donde el sistema de enfoque y la lámina piezoeléctrica (110) están en contacto.

5 10. El receptor según cualquiera de las reivindicaciones 8 ó 9 caracterizado por que comprende el sistema de enfoque según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 4, el espesor de la zona central plana de la superficie cóncava de la lente cóncava (115) es igual a un cuarto de la longitud de onda del ultrasonido en la lente a la frecuencia central del receptor.

10 11. Transductor de ultrasonidos focalizado y acoplado al aire con una frecuencia central comprendida entre 0,1 MHz y 2,0 MHz y una apertura angular de entre 3 ° y 20 ° caracterizado por que comprende un emisor según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 7 y/o un receptor según las reivindicaciones 8 a 10, donde el emisor y el receptor están alineados y enfrentados entre sí.

15 12. El transductor según la reivindicación 11, caracterizado por que comprende un emisor según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 7 y un receptor según las reivindicaciones 8 a 10, donde el espesor de la lámina piezoeléctrica (114) del receptor es distinto al espesor de la lámina piezoeléctrica (114) del emisor y donde la frecuencia de resonancia mecánica de la lámina piezoeléctrica (114) en el receptor Rx es igual a la frecuencia de resonancia eléctrica de la lámina piezoeléctrica (114) en el emisor Tx y donde ambas frecuencias se sitúan a la frecuencia central del transductor.

Fig. 1

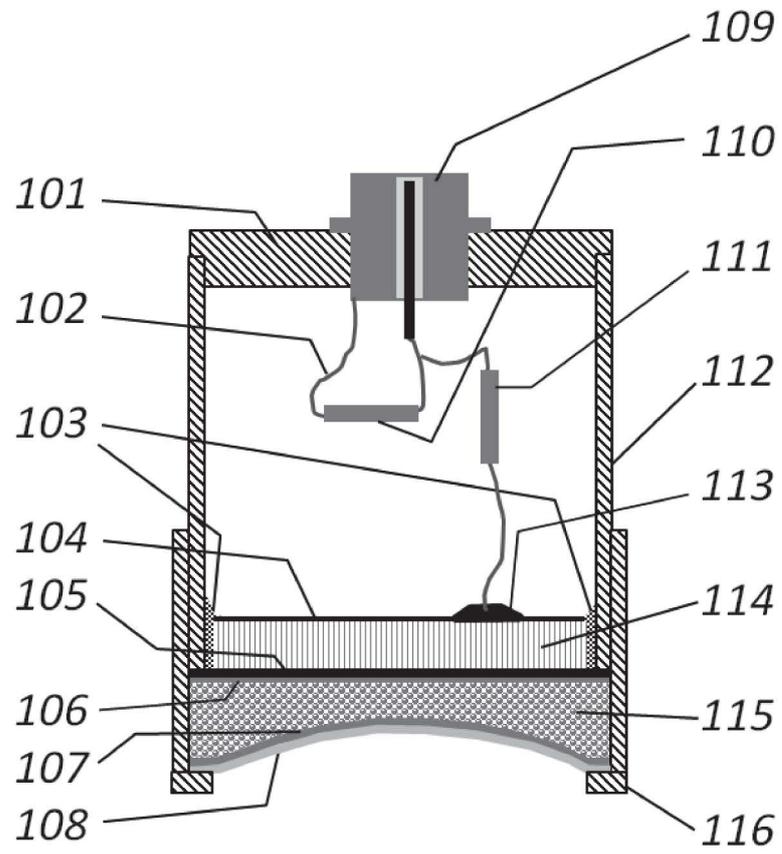


Fig. 2

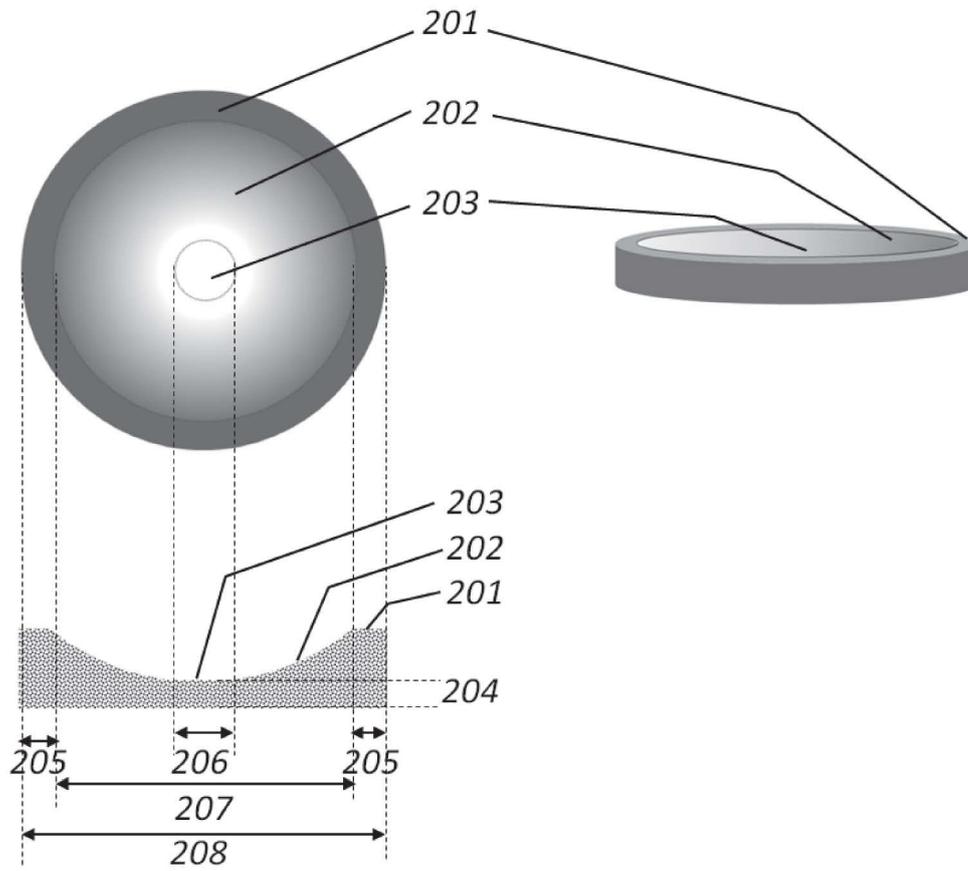


Fig. 3

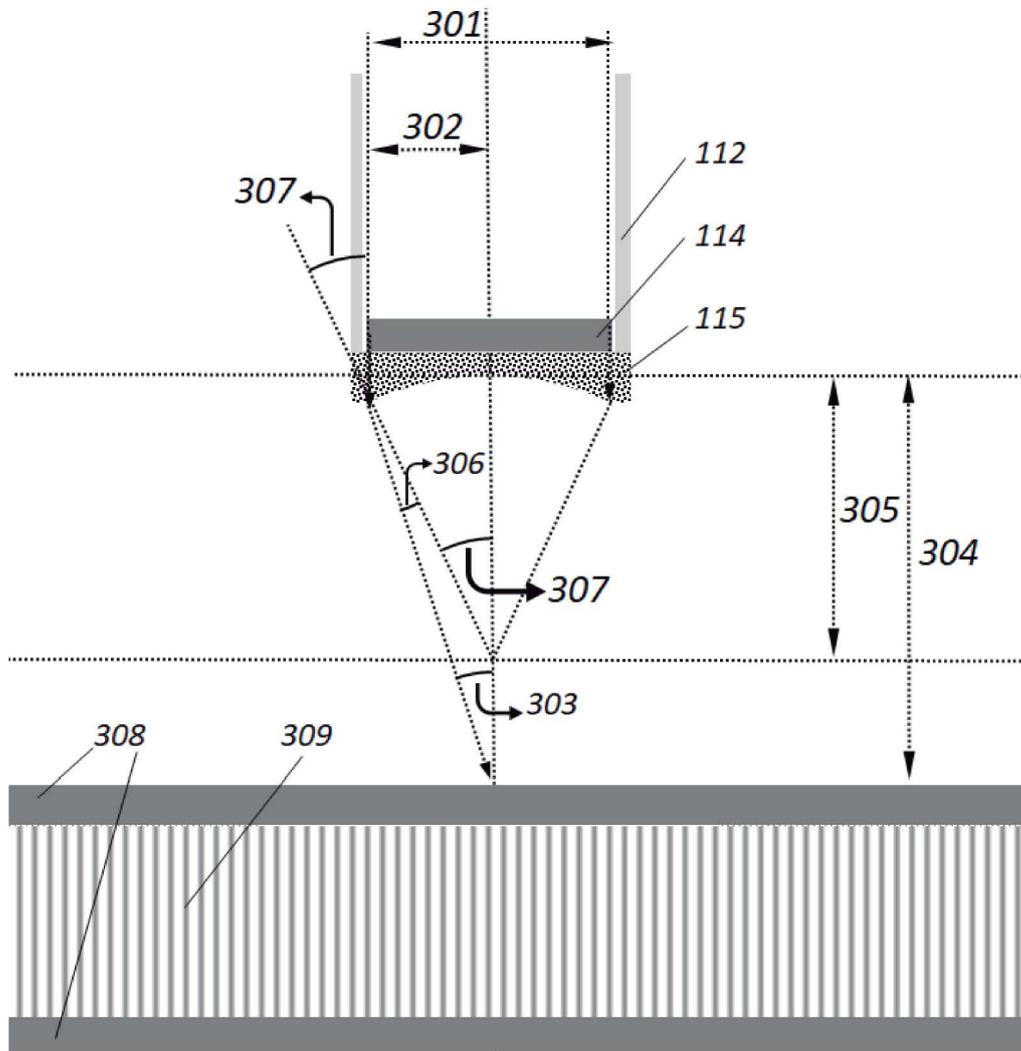


Fig. 4

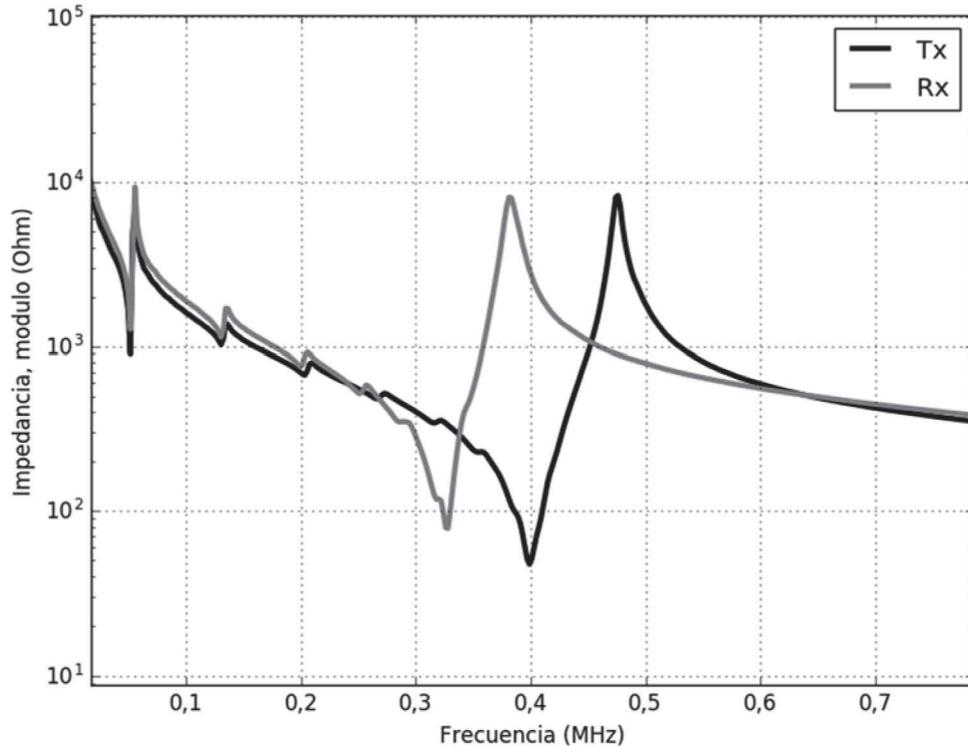


Fig. 5

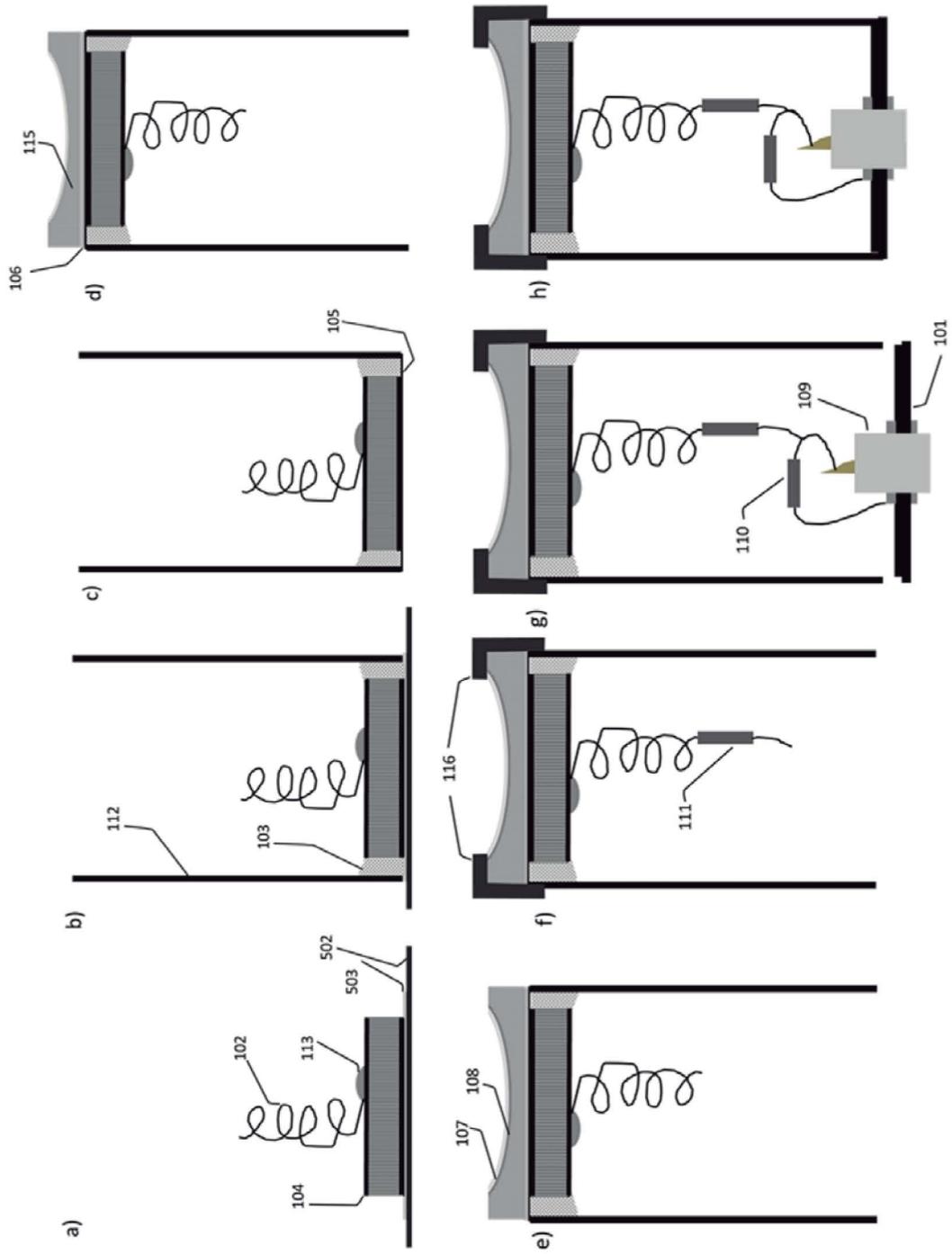


Fig. 6

