

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 962 855**

51 Int. Cl.:

G02F 1/35 (2006.01)

G06N 10/00 (2012.01)

H04B 10/70 (2013.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.05.2020** **E 20174866 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.08.2023** **EP 3910414**

54 Título: **Transductor de fotones de microondas a óptico**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la
traducción de la patente:
21.03.2024

73 Titular/es:

MIRAEX SA (100.0%)
Chemin de la Dent d'Oche 1b
1024 Ecublens VD, CH

72 Inventor/es:

ANDERSON, MITCHELL;
JAVERZAC-GALY, CLÉMENT y
FEOFANOV, OLEXIY

74 Agente/Representante:

LÓPEZ CAMBA, María Emilia

ES 2 962 855 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

Transductor de fotones de microondas a óptico

5 CAMPO TÉCNICO

La presente invención se refiere a un aparato configurado para acoplar señales ópticas y de microondas. Más específicamente, el aparato está configurado como un transductor de fotones de microondas a óptico. El aparato propuesto puede usarse para medir señales de microondas detectando señales de salida ópticas del aparato, ya que las señales de salida ópticas son proporcionales a las señales de entrada de microondas. La invención también se refiere a un procedimiento correspondiente de funcionamiento del aparato.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Los circuitos de microondas o superconductores generalmente se colocan en un entorno criogénico, a menudo llamado etapa de microondas, para minimizar el ruido ambiental. Señales de microondas débiles, especialmente aquellas que transportan información cuántica sobre el estado cuántico del sistema cuántico de interés, son muy sensibles a cualquier ruido adicional, que puede ser generado por un detector diseñado para medir las señales de microondas. Por ejemplo, un detector puede tener una fuente de alimentación y puede disipar algo de energía térmica creando ruido térmico, lo que destruiría el estado cuántico y/o reduciría la sensibilidad del detector. Esto significaría que el detector ya no sería capaz de medir fotones de microondas individuales. Existen algunas soluciones para medir directamente los fotones de microondas. Sin embargo, estas soluciones requieren que el detector se coloque dentro de la etapa de microondas enfriada. Estas soluciones tienen además el inconveniente de que los detectores disipan demasiada energía, lo que aumenta el ruido térmico dentro de la etapa de microondas. El ruido puede, a su vez, hacer que el estado cuántico colapse. Esto significa que las soluciones se pueden utilizar para detectar fotones de microondas individuales solo después de una fase de recuperación determinada.

También se sabe cómo medir las señales de microondas a temperatura ambiente a partir de las señales de microondas que se originan en las etapas de microondas enfriadas. Sin embargo, estas soluciones tienen el inconveniente de que se necesitan muchos amplificadores y cableado eléctrico entre el dispositivo detector y la etapa de microondas enfriada. Desafortunadamente, los amplificadores y el cableado eléctrico son fuentes de ruido térmico y también requieren mucho espacio.

El documento US20170248832A1 describe un dispositivo de conversión de microondas a óptico que comprende: un resonador de microondas superconductor y un resonador óptico que incluye un material electroóptico. El resonador de microondas superconductor y el resonador óptico están dispuestos uno con respecto al otro para estar acoplados electromagnéticamente.

El documento de bibliografía no de patente XP055733134 se refiere a un convertidor óptico a microondas, donde el efecto físico utilizado para la conversión se basa en el comportamiento no lineal de un material polimérico electroóptico.

El documento de bibliografía no de patente XP080962009 se refiere a una verdadera conversión ascendente o descendente de banda lateral única en un resonador de modo de galería de susurros triplemente resonante.

El documento de patente US8331008B1 se refiere a receptores fotónicos de microondas y RF basados en resonadores electroópticos en modo galería de susurros.

RESUMEN DE LA INVENCION

Un objeto de la presente invención es superar al menos algunos de los problemas identificados anteriormente relacionados con las disposiciones para detectar tanto fotones de microondas individuales como señales de microondas continuas débiles.

Según un primer aspecto de la invención, se proporciona un transductor de fotones de microondas a óptico como se indica en la reivindicación 1.

La nueva solución propuesta tiene la ventaja de que el transductor se puede usar para medir señales de estado cuántico de microondas o señales de microondas de bajo nivel sin disipar sustancialmente la energía o disipar la energía mucho menos que en las soluciones de la técnica anterior. Esto se puede lograr sin perturbar el estado cuántico y/o la etapa de medición de microondas. La solución propuesta permite la medición de cada fotón de un flujo de señal de microondas, y con una alta tasa de repetición. Además, la solución propuesta reduce drásticamente la cantidad de cableado eléctrico dentro y conectado al entorno criogénico, lo que reduce el ruido térmico adicional. Además, no se necesitan amplificadores de señal entre el transductor propuesto y un sensor óptico, que puede estar a temperatura ambiente. El transductor propuesto es aplicable a todo tipo de señales de microondas, como espines, circuitos superconductores, ordenadores cuánticos enfriados criogénicamente, puntos cuánticos, etc.

El transductor propuesto está configurado para acoplar una señal de entrada de microondas y una señal de entrada óptica para permitir que el aparato genere una o más señales de salida óptica que son proporcionales a la señal de entrada de microondas. El aparato es capaz de implementar este acoplamiento de manera muy eficiente. En otras palabras, la eficiencia de acoplamiento para convertir fotones de microondas en fotones ópticos es muy alta. La eficiencia de conversión o acoplamiento se puede expresar como la relación entre los números de fotones de microondas convertidos y de fotones ópticos detectados. El aparato propuesto también tiene la ventaja de que el ancho de banda del aparato es muy alto, lo que significa que las señales de microondas entrantes pueden dispersarse en un gran ancho de banda de frecuencia, y el aparato aún podría transducir fotones de microondas de estas señales en fotones ópticos.

Según un segundo aspecto de la invención, se proporciona un sistema de detección de señal de microondas que comprende el transductor según el primer aspecto y que comprende además un sensor como se indica en la reivindicación 14.

Según un tercer aspecto de la invención, se proporciona un procedimiento de funcionamiento del transductor de fotones de microondas a óptico como se indica en la reivindicación 15.

Otros aspectos de la invención se enumeran en las reivindicaciones dependientes adjuntas a la presente.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Otras características y ventajas de la invención resultarán evidentes a partir de la siguiente descripción de realizaciones de ejemplo no limitativas, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- La Figura 1 ilustra esquemáticamente el aparato propuesto según una realización de ejemplo de la presente invención;
- La Figura 2 es una vista en sección transversal que muestra ejemplos de guías de ondas ópticas y de microondas que se pueden usar en el aparato de la Figura 1;
- La Figura 3 es una vista en sección transversal que muestra otros ejemplos de guías de ondas ópticas y de microondas que se pueden usar en el aparato de la Figura 1;
- Las Figuras 4a a 4h son vistas esquemáticas en sección transversal que ilustran diferentes configuraciones para las guías de ondas ópticas y de microondas que se pueden usar en el aparato de la Figura 1;
- Las Figuras 5 y 6 son diagramas que muestran diferentes señales de ejemplo en el dominio de la frecuencia que pueden estar presentes en el aparato de la Figura 1 en diferentes escenarios de aplicación;
- La Figura 7 ilustra las posibles formas de onda de señal en un material no lineal del aparato de la Figura 1;
- La Figura 8 ilustra esquemáticamente una disposición de detección de señal de microondas;
- La Figura 9 ilustra una configuración apilada de una unidad de circuito de microondas y un conjunto de aparatos;
- La Figura 10 ilustra una configuración de una sola capa de una unidad de circuito de microondas y un conjunto de aparatos;
- Las Figuras 11a a 11e ilustran esquemáticamente diferentes disposiciones para crear una brecha de banda fotónica en el aparato de la Figura 1;
- La Figura 12 ilustra esquemáticamente una disposición de coincidencia de fase que puede usarse en el aparato de la Figura 1;
- La Figura 13 muestra ejemplos de microondas y formas de onda ópticas en el dominio del tiempo;
- La Figura 14 ilustra cómo se pueden integrar las señales de la Figura 13 sin llevar a cabo la coincidencia de fase;
- La Figura 15 ilustra cómo se pueden integrar las señales de la Figura 13 cuando se aplica la coincidencia de fase según un primer ejemplo;
- La Figura 16 ilustra cómo se pueden integrar las señales de la Figura 13 cuando se aplica la coincidencia de fase según un segundo ejemplo;
- La Figura 17 muestra un circuito resonante LC que puede usarse junto con el aparato de la Figura 1;
- La Figura 18 muestra un circuito resonante RLC que puede usarse junto con el aparato de la Figura 1;
- La Figura 19 ilustra esquemáticamente la configuración de microondas y guías de ondas ópticas de la Figura 4c;
- La Figura 20 ilustra esquemáticamente un ejemplo de resonador de microondas distribuido que se puede usar en la configuración mostrada en la Figura 19; y
- La Figura 21 ilustra esquemáticamente un ejemplo de resonador de microondas distribuido que se puede usar en la configuración mostrada en la Figura 4f.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE UNA REALIZACIÓN DE LA INVENCION

Algunas realizaciones de la presente invención se describirán ahora en detalle con referencia a las figuras adjuntas. Las realizaciones se describen en el contexto de un transductor configurado para transducir señales de entrada de microondas en una o más señales de salida ópticas, que a continuación pueden ser detectadas por un sensor de dominio óptico. La transducción entre las excitaciones de microondas y ópticas normalmente tendría lugar a temperaturas de milikelvins con una eficiencia suficientemente alta. El aparato propuesto, gracias a su eficiencia y ancho de banda, abre nuevas oportunidades en la detección. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que las enseñanzas de la invención no se limitan a este entorno. A los elementos funcionales y estructurales idénticos o

correspondientes que aparecen en los diferentes dibujos se les asignan los mismos números de referencia.

La Figura 1 ilustra esquemáticamente de manera simplificada la estructura de un aparato 1 para generar un acoplamiento entre una señal de microondas y una señal óptica. Más específicamente, en las siguientes realizaciones de ejemplo, el aparato funciona así como un convertidor o transductor de fotones de microondas a ópticos. Como se explica más adelante con más detalle, el transductor 1 también cuenta con una función de amplificación. El transductor en el ejemplo de la Figura 1 comprende un primer terminal o puerto de entrada 3 y un segundo terminal o puerto de entrada 5. En este ejemplo, el primer puerto de entrada 3 está configurado para recibir una señal de bombeo óptico o múltiples señales de bombeo óptico, mientras que el segundo puerto de entrada 5 está configurado para recibir señales de microondas. El número de fotones en las señales de bombeo óptico suele ser mucho mayor que el número de fotones en las señales de microondas. En la presente descripción, por señales de microondas se entienden señales que tienen su frecuencia de señal en la región de microondas, mientras que por señales ópticas se entienden señales que tienen su frecuencia de señal en la región óptica. La región óptica del espectro electromagnético (EM) se refiere aproximadamente a la región con longitudes de onda entre 100 nm (frecuencia de 3 PHz) y 1 mm (300 GHz) que comprende las regiones ultravioleta, visible e infrarroja. Se debe tener en cuenta que es de particular interés la banda de infrarrojo cercano utilizada para la telecomunicación de fibra óptica, que se extiende aproximadamente de 1260 a 1675 nm, así como la banda visible, que se extiende aproximadamente de 390 a 780 nm. La región de microondas del espectro EM se refiere aproximadamente a la región con longitudes de onda entre 1 mm (300 GHz) y 1 m (300 MHz).

Como se muestra en la Figura 1, el transductor 1 también comprende un primer puerto de salida 9 y un segundo puerto de salida 11. En este ejemplo, el primer puerto de salida está configurado para emitir señales ópticas, mientras que el segundo puerto de salida está configurado para emitir señales de microondas. Una primera guía de ondas 13 se coloca entre el primer puerto de entrada 3 y el primer puerto de salida 9. Por lo tanto, el primer extremo de la primera guía de ondas está acoplado o conectado al primer puerto de entrada 3, mientras que un segundo extremo opuesto de la primera guía de ondas 13 está acoplado o conectado al primer puerto de salida 9. Por lo tanto, la primera guía de ondas se extiende longitudinalmente entre el primer puerto de entrada y el primer puerto de salida. Como las señales ópticas están dispuestas para propagarse a través de la primera guía de ondas, esta guía de ondas también se denomina guía de ondas óptica. Una segunda guía de ondas 15 se coloca entre el segundo puerto de entrada 5 y el segundo puerto de salida 11. Por lo tanto, el primer extremo de la segunda guía de ondas está acoplado o conectado al segundo puerto de entrada 5, mientras que un segundo extremo opuesto de la segunda guía de ondas 15 está acoplado o conectado al segundo puerto de salida 11. Por lo tanto, la segunda guía de ondas se extiende longitudinalmente entre el segundo puerto de entrada y el segundo puerto de salida. Como las señales de microondas están dispuestas para propagarse a través de la segunda guía de ondas, esta guía de ondas también se conoce como guía de ondas de microondas.

La Figura 1 también muestra una zona de interacción 17 con una longitud L, donde el campo electromagnético (EM) generado por los fotones de microondas que viajan dentro de la guía de ondas de microondas 15 comienza a interactuar con el campo electromagnético generado por los fotones ópticos que viajan dentro de la guía de ondas óptica. Estos dos campos electromagnéticos están acoplados por un material no lineal presente en la zona de interacción como se explica más adelante con más detalle. Cabe señalar que el transductor 1 en este ejemplo es un elemento sin cavidad. En otras palabras, el transductor 1 en este ejemplo no comprende ninguna estructura resonante y, por lo tanto, es un aparato sin resonador. Esto significa que solo las ondas viajeras, a diferencia de las excitaciones resonantes, están presentes en el transductor cuando se utiliza.

Las Figuras 2 y 3 son vistas en sección transversal que muestran dos configuraciones diferentes de las guías de ondas primera y segunda 13, 15. Las secciones transversales se toman a lo largo de un plano que es ortogonal al eje longitudinal de las guías de ondas. Cabe señalar que en el ejemplo que se muestra en la Figura 1, los ejes longitudinales de las guías de ondas son ejes curvos. Con referencia a la configuración de guía de ondas mostrada en la Figura 2, la segunda guía de ondas 15 comprende un primer electrodo 19 y un segundo electrodo 21. Además, un material dieléctrico, en este ejemplo un material dieléctrico de baja pérdida, que puede ser aire, por ejemplo, y que se coloca entre el primer y segundo electrodo 19, 21 también puede considerarse parte de la segunda guía de ondas 15. En este ejemplo, ambos electrodos son superconductores. Por lo tanto, las señales de microondas están dispuestas para viajar en el material dieléctrico de baja pérdida al rebotar entre los electrodos. La primera guía de ondas 13 está en la configuración de la Figura 2 también colocada entre los dos electrodos. En este ejemplo, la primera guía de ondas 13 está hecha del material no lineal, que también puede denominarse medio activo. La Figura 2 también muestra las primeras líneas de campo electromagnético 23 y las segundas líneas de campo electromagnético 25 (estas líneas de campo se muestran como líneas discontinuas en las Figuras 2 y 3). Las primeras líneas de campo electromagnético visualizan un campo electromagnético generado por la propagación de fotones dentro de la guía de ondas de microondas 15, mientras que las segundas líneas de campo electromagnético visualizan un campo electromagnético generado por la propagación de fotones dentro de la guía de ondas óptica 13. Cabe señalar que el primer y segundo electrodo no tienen que ser idénticos, aunque pueden ser idénticos. Además, los electrodos pueden ser del mismo tamaño o más pequeños o más grandes que la guía de ondas óptica. Uno de los dos electrodos puede estar directamente conectado a tierra o indirectamente conectado a tierra a través de un condensador, un inductor o una resistencia. Alternativamente, ambos electrodos 19, 21 pueden estar flotando. Además, existe preferentemente un espacio físico entre la guía de ondas de microondas 15 y el material no lineal. De lo contrario, la propagación del campo óptico podría degradarse. La distancia entre la respectiva guía de ondas de microondas y el material no lineal

se indica en la Figura 2 con S.

La disposición de la Figura 3 es similar a la disposición de la Figura 2, pero con la diferencia principal de que la guía de ondas óptica 13 comprende un componente o elemento no lineal 27, que está formado por el material no lineal, y un componente o elemento lineal 29. Tanto los componentes no lineales como los lineales son dieléctricos. En el ejemplo que se muestra en la Figura 3, el componente no lineal 27 se coloca en la parte superior del componente lineal 29, para estar en contacto directo entre sí. Sin embargo, existen muchas otras disposiciones alternativas para construir la guía de ondas óptica compuesta 13. Más específicamente, el componente no lineal 27 puede colocarse debajo del componente lineal 29, o podrían colocarse uno al lado del otro. Estos tipos de disposiciones tienen la ventaja de que no hay necesidad de grabar el material no lineal, lo que simplifica la fabricación, pero el acoplamiento de interacción no es tan fuerte como en la configuración de la Figura 2, donde la guía de ondas óptica 13 está hecha total o sustancialmente en su totalidad del material no lineal. También es posible construir la guía de ondas óptica de modo que el material lineal estaría completamente o sustancialmente completamente encapsulado por el material no lineal aparte de sus extremos longitudinales, es decir, cuando se mira la sección transversal de la guía de ondas óptica, el material lineal estaría completamente o sustancialmente completamente encapsulado por el material no lineal.

Las Figuras 4a a 4h son vistas en sección transversal que muestran diferentes configuraciones para las guías de ondas de microondas 15 con respecto a la guía de ondas óptica 13. Cabe señalar que en las Figuras 4a a 4h, la guía de ondas óptica 13 puede estar hecha completamente del material no lineal o puede ser una guía de ondas compuesta por los materiales no lineales y lineales. Como se puede observar, las configuraciones de las Figuras 4b y 4f comprenden un tercer electrodo 22, que también es parte de la guía de ondas de microondas 15. Además, en la configuración de la Figura 4f, los tres electrodos 19, 21, 22 se colocan uno al lado del otro en un lado de la guía de ondas óptica 13. Cabe señalar que uno, dos o todos los electrodos de la guía de ondas de microondas 15 pueden conectarse al segundo puerto de entrada 5.

En funcionamiento, el aparato 1 funciona como un transductor de señal de microondas a óptico, es decir, los fotones de microondas incidentes en el segundo puerto de entrada 5 se transducen en fotones ópticos en el primer puerto de salida 9. Para lograr esto, se alimentan una o más señales de bombeo óptico en el primer puerto de entrada 3, y se configuran adecuadamente como se explicará más adelante con más detalle. Sin embargo, también es posible alimentar una señal de bomba de microondas en el segundo puerto de entrada 5. El aparato 1 está diseñado para permitir la interacción eficiente de la propagación de microondas y fotones ópticos en el material no lineal. Para lograr esto, las señales de microondas y ópticas que se propagan en sus respectivas guías de onda están adaptadas en fase o casi adaptadas en fase. La interacción en el material no lineal se considera paramétrica, es decir, la interacción se activa al proporcionar energía, que se origina, por ejemplo, a partir de una o más fuentes de fotones ópticos (por ejemplo, LASER) (no mostradas en los dibujos), que se utilizan para producir las señales del bombeo óptico. El procedimiento paramétrico es instantáneo y, por lo tanto, la fuerza de interacción se ve mejorada por el flujo de fotones de la bomba (es decir, las señales del bombeo óptico). Además, dado que no se utilizan resonadores de factor de alta calidad, el ancho de banda de la señal se puede hacer notablemente alto. Las frecuencias de las señales de salida están relacionadas linealmente con las frecuencias de las señales de microondas incidentes y las frecuencias de las señales de la bomba. Cabe señalar que, además de proporcionar al menos una señal de bombeo óptico, también se podría proporcionar un campo eléctrico de corriente continua (CC). La dirección del campo se puede cambiar periódicamente para emular la polarización periódica como se explica más adelante con más detalle.

La interacción no lineal más simple, que puede tener lugar en el transductor 1, es una mezcla de tres ondas que resulta en la generación de una frecuencia suma y una frecuencia diferencia. Para la implementación de la mezcla de tres ondas, se requiere al menos una frecuencia o tono de bomba. Alternativamente, se puede utilizar una mezcla de cuatro ondas o una no linealidad de orden superior con un mayor número de tonos de bomba (uno de los cuales puede ser un voltaje de corriente continua (CC)). Por lo tanto, se pueden usar al menos dos tipos de medios no lineales, a saber, un material no lineal de segundo orden para implementar la mezcla de tres ondas, y un material no lineal de tercer orden para implementar la mezcla de cuatro ondas. La interacción en el material no lineal se describe mediante las siguientes ecuaciones, donde z es el eje de propagación de la onda (y se muestra en la Figura 1 por las flechas):

$$-ig_0a_p b - \chi_a^{-1}a_a \partial_z b = -ig_0a_p^+ a_a - \chi_m^{-1}b$$

. En las ecuaciones anteriores:

- i denota la unidad imaginaria;
- g_0 denota la fuerza de acoplamiento de vacío de onda viajera (esta propiedad depende de las propiedades del material);
- a_a denota el operador de envolvente de campo de fotones resultante;
- a_p denota el operador de envolvente de campo de bomba-fotón;
- a_p^+ denota el operador de envolvente de campo de bomba-fotón conjugado;
- b denota el operador de la envolvente del campo de fotones de microondas;
- χ_a denota la susceptibilidad del modo de fotón óptico resultante, que es una función de respuesta óptica de la guía de onda a un fotón de entrada; y

• χ_m denota la susceptibilidad del modo de fotones de microondas, que es la función de respuesta de microondas de la guía de ondas a un fotón de entrada.

Además, g_0 es proporcional a:

$$\sum_{z=1}^M \int_{D_z} \epsilon_{ik} \epsilon_{jl} r_{klm}^{(eff)} E_b^m(\omega_b) E_a^l(\omega_a) E_a^j(\omega_a) dD_z,$$

donde D_z es uno de los M dominios de interacción, ϵ_k es el tensor de permitividad del cristal no lineal, $E_b(\omega_b)$ es el campo eléctrico generado por los fotones de microondas en propagación a la frecuencia de microondas ω_b , $E_a(\omega_a)$ es

- 10 el campo eléctrico generado por los fotones ópticos en propagación a la frecuencia óptica ω_a , y $r_{klm}^{(eff)}$ es el tensor de los coeficientes efectivos de mezcla de tres ondas. Además, i, j, k, l y m son índices de suma que toman valores 1, 2 y 3 (o alternativamente x, y, z ya que corresponden a los componentes de los vectores de campo eléctrico (proyecciones a los ejes de coordenadas) y la permitividad y los tensores electroópticos efectivos). Aquí seguimos la convención de suma de Einstein, es decir, cuando una variable de índice aparece dos veces en un solo término y no
- 15 se define de otro modo, implica la suma de ese término sobre todos los valores del índice. $r_{klm}^{(eff)}$ es dependiente del material y, además, dependiente de la bomba (modificado por el campo eléctrico adicional de la señal del bombeo óptico). El objetivo es maximizar g_0 (la fuerza de acoplamiento de la interacción no lineal). Una forma de lograr esto es optimizar la interacción de los campos eléctricos ajustando la geometría, configuración y separación de los electrodos 19, 21, 22 de la guía de ondas de microondas 15 con respecto a la guía de ondas óptica 13, de modo que
- 20 los campos eléctricos ópticos y de microondas generados interactúen de manera óptima con la estructura atómica no lineal (maximizando los productos tensores en la ecuación anterior para g_0).

- Si se utiliza un material no lineal de segundo orden, a continuación r -efectivo (es decir, $r_{klm}^{(eff)}$) es directamente
- 25 proporcional al tensor electroóptico del material (r_{klm}). Además, en este ejemplo, si se utiliza un material no lineal de segundo orden, a continuación solo es necesaria una señal de bombeo óptico (además de la señal de microondas). Se puede utilizar cualquier material cristalino óptico no centrosimétrico, o una combinación de dichos materiales, para el material no lineal de segundo orden: por ejemplo, LiNbO_3 , GaP , BaTiO_3 , LiTaO_3 , $\text{p-BaB}_2\text{O}_4$, AlN , LiB_3O_5 , KTiOPO_4 , KNbO_3 , KH_2PO_4 , LiIO_3 , $(\text{NH}_4)(\text{H}_2\text{PO}_4)$, CdSe , GaAs , InN , InSb , ZnTe , y $\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$. Si se utiliza un material no lineal de tercer orden, a continuación r -eficaz es proporcional al tensor no lineal de tercer orden del material (χ_{klmn}) y un
- 30 campo de CC o una señal de bomba adicional (también llamada "tono"). Por lo tanto, en este caso, se necesitarían al menos dos fuentes de energía, a saber, una señal de bombeo óptico y un campo eléctrico de CC o una señal de bomba adicional, ya sea óptica o de microondas. En la práctica, el campo E_n se elige como "DC" (es decir, $\omega_n = 0$) cuando el objetivo es evitar cualquier producto de mezcla parásito. Sin embargo, la dificultad es que sería necesario aplicar una gran tensión de CC (unas pocas decenas de voltios). Alternativamente, en la práctica, el campo E_n se elige como un tono de microondas o de bombeo óptico ($\omega_n \neq 0$). La ventaja sobre la configuración de CC es que el voltaje requerido será menor que el de la configuración de CC. Las técnicas anteriores permiten controlar y aumentar la "mezcla efectiva de tres ondas" mediante el uso del campo adicional E_n . Se puede usar cualquier material cristalino óptico centrosimétrico, o una combinación de tales materiales, para el material no lineal de tercer orden: por ejemplo, SiN_x , SiO_2 (Cuarzo), Al_2O_3 (Zafiro), Si , $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, Diamante, SiC , SiGe , CaF_2 , MgF_2 .

- 40 Las presentes realizaciones de ejemplo presentan uno o más espacios de banda fotónica, denominados simplemente espacios fotónicos, para suprimir frecuencias de salida no deseadas. Un espacio fotónico es un intervalo de frecuencias en un material prohibido para los campos ópticos. Se pueden generar uno o más espacios fotónicos (típicamente más de un espacio fotónico) mediante estructuras modificadas del material con distribuciones espaciales
- 45 periódicas. Por lo tanto, puede entenderse que un espacio fotónico surge de una "red fotónica" con dimensiones características del mismo orden que la longitud de onda del fotón óptico. La interacción no lineal generalmente da como resultado múltiples frecuencias de salida (productos de mezcla). Para suprimir la generación de productos de mezcla no deseados, la guía de ondas óptica 13 se estructura periódicamente de modo que la frecuencia o frecuencias no deseadas caigan en un espacio o espacios fotónicos. La dimensión de la estructura periódica de la guía de ondas es proporcional a la longitud de onda óptica (que en este ejemplo es de aproximadamente $1,5 \mu\text{m}$).

- El diagrama de la Figura 5 ilustra esquemáticamente algunas de las señales que están presentes en el transductor 1 según la primera realización, donde una señal de bomba de entrada óptica S_{pi_in1} se alimenta al primer puerto de
- 55 entrada 3, y una señal de entrada de microondas S_{in2} se alimenta al segundo puerto de entrada 5. En los diagramas de las Figuras 5 y 6, el eje x representa la frecuencia de la señal, mientras que el eje y representa el número de fotones. Además, en la Figura 5, Ω_1 denota la frecuencia de señal de la señal de microondas (señal de entrada y/o salida), que en este ejemplo se propaga a través de la guía de ondas de microondas 15. En este escenario, una señal de entrada de microondas S_{in2} en el segundo puerto de entrada 5 y una señal de salida de microondas S_{out2} en el
- 60 segundo puerto de salida 11 tienen sustancialmente la misma frecuencia Ω_1 . La señal de entrada de microondas S_{in2} y la señal de salida de microondas S_{out2} se consideran de hecho la misma señal de microondas, pero la potencia de la señal en la salida no es la misma que en la entrada. La frecuencia de la señal de bombeo de entrada óptica S_{pi_in1}

y la señal de bombeo de salida óptica S_{pi_out1} se indica con Ω_{pi} , mientras que la frecuencia de la señal de no bombeo de salida óptica (la señal de ralenti) se indica con Ω_2 . De nuevo, la señal de bomba de entrada óptica S_{pi_in1} y la señal de bomba de salida óptica S_{pi_out1} se consideran de hecho la misma señal óptica, pero la potencia de la señal en la salida no es la misma que en la entrada. Como se mencionó anteriormente, si se utiliza el medio no lineal de segundo orden en el aparato de interacción, a continuación solo se necesita una señal de bomba. La señal de salida en el primer puerto de salida 9 comprende un primer componente de señal de salida, a saber, una señal de bomba de salida óptica S_{pi_out1} pero que tiene menos fotones que la señal de bomba de entrada óptica S_{pi_in1} pero sustancialmente la misma frecuencia Ω_{pi} , y una señal mezclada o una señal óptica de salida sin bomba S_{out1} , que es una señal de diferencia de frecuencia, o una señal de banda lateral inferior, resultante de la mezcla de señales de las señales de entrada. La frecuencia de la señal de banda lateral inferior S_{out1} es Ω_2 , donde Ω_2 es proporcional a $\sum_i a_i \Omega_{pi} - \beta \Omega_1$, donde los coeficientes a_i (donde i puede tomar valores de 1 a N) y β son números reales. En el escenario de la Figura 5, el número de fotones en la señal de salida de microondas S_{out2} es aproximadamente igual a la suma del número de fotones en la señal de entrada de microondas S_{in2} y el número de fotones en la señal de banda lateral inferior S_{out1} , es decir, $S_{out2} = S_{in2} + S_{out1}$.

La señal de banda lateral inferior, también llamada señal de ralenti o ralenti según la terminología utilizada para describir un procedimiento de amplificación paramétrica, es la señal de salida deseada en el escenario anterior, y como se muestra en la Figura 5, su frecuencia se encuentra en el dominio de la frecuencia óptica. Como se explicó anteriormente, con el fin de optimizar la intensidad de la señal, se utiliza un espacio fotónico (que define un dominio de frecuencia prohibido). La Figura 5 también muestra la ubicación del espacio fotónico en el dominio de frecuencia. Por lo tanto, se suprime cualquier señal óptica con su frecuencia dentro de este espacio, tal como cualquier frecuencia de banda lateral superior no deseada resultante de la mezcla de las señales de entrada. Cabe señalar que el número de fotones contenidos en las señales no está necesariamente dibujado a escala, es decir, las proporciones no son necesariamente correctas. Además, el eje de frecuencia es discontinuo, ya que las frecuencias de microondas son más pequeñas que las frecuencias ópticas en órdenes de magnitud. También debe observarse que el número de fotones contenidos en las señales de bomba es mucho mayor que en las otras señales que no son de bomba que se muestran en la Figura 5, y para representar esto, las señales de bomba se dibujan con líneas discontinuas.

El procedimiento ilustrado en el diagrama de la Figura 5 es un procedimiento de amplificación paramétrica no degenerada. Esto significa que la amplificación de las señales a la frecuencia Ω utiliza la energía de la señal de la bomba de entrada óptica aplicada externamente S_{pi_in1} a la frecuencia de $\Omega_2 + \Omega$ (es decir, la frecuencia del ralenti + la frecuencia de la señal de microondas). Como se mencionó anteriormente, el tono de ralenti está diseñado para estar en el dominio óptico. En este escenario, la amplificación de la señal de entrada de microondas y la generación de la señal de ralenti ocurren simultáneamente a lo largo de la guía de ondas óptica 13 en el material no lineal.

En la práctica, la frecuencia del bombeo óptico Ω_{pi} se elige en función de la frecuencia de la señal de entrada de microondas Ω y de la frecuencia de ralenti deseada Ω_2 (que está preferiblemente dentro del intervalo de detección de un detector óptico de fotones que se coloca después del transductor 1). Por lo tanto, la frecuencia del bombeo óptico Ω_{pi} se puede definir utilizando la ecuación $\Omega_{pi} = \Omega_1 + \Omega_2 \Leftrightarrow \Omega_2 = \Omega_{pi} - \Omega_1$. La potencia de salida máxima de la señal de ralenti en el régimen de amplificación lineal puede estar limitada por la inestabilidad paramétrica del modo de microondas (que puede activarse si la potencia de la señal de la bomba de entrada es demasiado alta). Cabe señalar que la frecuencia de ralenti es un subproducto del procedimiento de amplificación paramétrica. Este subproducto es típicamente no deseado en las aplicaciones existentes, pero se utiliza según la presente invención para detectar las señales de entrada de microondas, y más precisamente el número de fotones o la energía de esas señales, a medida que la señal de entrada de microondas amplificada se transduce al dominio óptico. La señal de ralenti S_{out1} puede a continuación ser detectada por un sensor fotodetector 53 (como se muestra, por ejemplo, en la Figura 8) conectado al primer puerto de salida 9. Como la señal de ralenti S_{out1} es proporcional a la señal de entrada de microondas, la detección de la señal de ralenti también permite la detección de la potencia de la señal de entrada de microondas. Ejemplos de posibles sensores son un fotodiodo de avalancha, un diodo de avalancha de un solo fotón, un fotodiodo, un fotodetector de nanohilos y un bolómetro. En el escenario de la Figura 5, la señal de banda lateral superior se suprime, pero podría ser posible suprimir la señal de banda lateral inferior en su lugar y mantener la señal de banda lateral superior. Sin embargo, esta forma de operar el transductor no conduciría a un procedimiento de amplificación. Por lo tanto, sería más difícil detectar la señal de banda lateral superior con un fotodetector comercial. En otras palabras, se necesitaría un fotodetector más caro y/o la operación de detección sería menos eficiente.

La presente invención según la primera realización se basa, por lo tanto, en la idea de utilizar la señal de banda lateral inferior S_{out1} (la señal de ralenti) para detectar la señal de entrada de microondas original S_{in2} . Además, el procedimiento utiliza ondas viajeras para mezclar las señales del bombeo óptico y las microondas. Por el contrario, las soluciones conocidas usan oscilaciones resonantes. Se debe tener en cuenta que antes de detectar la polea loca, es beneficioso filtrar primero la señal de la bomba de salida óptica S_{pi_out1} . Para este propósito, se puede usar un filtro de paso de banda óptico, o la dirección de propagación de la señal loca se puede hacer diferente de la dirección de propagación de la señal del bombeo óptico para separar las ondas en el espacio. Si esta operación no se lleva a cabo, a continuación la señal de ralenti podría ser difícil de resolver junto a la señal del bombeo óptico en el detector 53. Además, también se puede generar una segunda espacio fotónico, que estaría aproximadamente a una frecuencia igual al doble de la frecuencia del bombeo óptico Ω_{pi} . Esto suprimiría la generación de fotones dentro de un intervalo de frecuencia de aproximadamente $2 \times (\Omega_{pi} - \Omega_1)$ a $2 \times (\Omega_{pi} + \Omega_1)$. No se requiere generar el segundo espacio fotónico,

pero generarlo sería ventajoso ya que la eficiencia aumentaría. Más específicamente, el segundo espacio fotónico evita la pérdida de fotones de la señal de ralenti a una frecuencia más alta (de modo que no se detectaría después de la transducción).

El diagrama de la Figura 6 ilustra esquemáticamente algunas de las señales que están presentes en el transductor 1 según una segunda realización. En este caso, se aplican las mismas señales de entrada que en la primera realización de la Figura 5 (pero no necesariamente con el mismo número de fotones que en la primera realización ilustrada en la Figura 5) al transductor 1, pero no se utiliza ningún espacio fotónico para suprimir ninguna de las señales de banda lateral o ralenti. Sin embargo, también en este escenario, un espacio fotónico puede o no estar presente a una frecuencia, que es igual al doble de la frecuencia del bombeo óptico Ω_{pi} . Por lo tanto, en este escenario, en el primer puerto de salida 9, están presentes tres señales, a saber, la señal de bomba de salida óptica S_{pi_out1} , una señal de banda lateral inferior S_{out11} , o una primera señal de ralenti (frecuencia inferior), y una señal de banda lateral superior S_{out12} , o una segunda señal de ralenti (frecuencia superior). La frecuencia de la señal de banda lateral inferior se indica con Ω_{21} , mientras que la frecuencia de la señal de banda lateral superior se indica con Ω_{22} . El procedimiento ilustrado en el diagrama de la Figura 6 es un procedimiento de amplificación paramétrica no degenerada y una conversión ascendente de frecuencia de fotones de microondas. Esto significa que el procedimiento de amplificación utiliza la señal de bomba de entrada óptica aplicada externamente S_{pi_in1} a la frecuencia de $\Omega_{21} + \Omega_1$ (es decir, la primera frecuencia de ralenti + frecuencia de señal de microondas) que proporciona energía para la amplificación. La tasa de amplificación es la misma que la tasa de conversión ascendente de los fotones de microondas en fotones ópticos. Más específicamente, en el transductor 1, los fotones de microondas se generan mediante amplificación paramétrica a la misma velocidad a la que los fotones de microondas se convierten en la señal de banda lateral superior. Por lo tanto, en la salida del transductor, la señal de entrada de microondas S_{in2} no se amplifica por el procedimiento. Esto significa que el número de fotones en la señal de salida de microondas S_{out2} es menor que el número de fotones en la señal de entrada de microondas S_{in2} debido a la pérdida de propagación en la guía de ondas de microondas 13. Las frecuencias de las dos señales ópticas de ralenti se pueden obtener de la siguiente manera: $\Omega_{21} = \Omega_{pi} - \Omega$ y $\Omega_{22} = \Omega_{pi} + \Omega$. La potencia de estas dos señales de ralenti puede ser muy alta (limitada a una cierta fracción de la potencia de la bomba). A continuación es posible filtrar una de las señales de ralenti después del aparato 1, procesarlas ópticamente de una manera diferente, o simplemente enviarlas ambas al sensor 53. Ambas señales de salida sin bomba o solo una de ellas pueden ser detectadas por el sensor fotodetector conectado al primer puerto de salida 9. Ejemplos de posibles sensores son un fotodiodo de avalancha, un diodo de avalancha de un solo fotón, un fotodiodo, un fotodetector de nanohilos y un bolómetro. Cabe señalar que en los ejemplos anteriores, las señales de entrada, o al menos algunas de ellas, se aplican al aparato simultáneamente. Además, el aparato puede ser reversible. En otras palabras, las señales de entrada se pueden aplicar al aparato desde cualquier extremo del aparato (las señales de salida estarían presentes en el extremo opuesto).

Por lo tanto, la segunda realización se basa en la idea de usar el procedimiento combinado de amplificación y conversión ascendente para detectar la señal de entrada de microondas original S_{in2} sin afectar la señal de entrada de microondas en sí (excepto por la pérdida de propagación en el aparato). De acuerdo con el escenario de la Figura 6, hay dos procedimientos simultáneos (es decir, que tienen lugar simultáneamente) en el transductor. Más específicamente, en cada parte del material no lineal, los fotones de microondas se amplifican (con la generación de ralenti óptico en la banda lateral inferior) y/o se convierten al intervalo de frecuencia óptica (a la banda lateral superior). Por ejemplo, si tenemos un fotón de microondas de entrada que se amplifica en un factor de 2 en una primera porción de longitud de la guía de ondas óptica, a continuación tenemos dos fotones en el modo de microondas, un fotón inactivo en la banda lateral inferior y cero fotones en la banda lateral superior. A continuación, uno de esos dos fotones de microondas se convierte a la banda lateral superior en una segunda porción de longitud. En este caso, tenemos un fotón de microondas, un fotón inactivo en la banda lateral inferior y un fotón en la banda lateral superior. Después de N pasos como ese, todavía tenemos uno o dos fotones de microondas y aproximadamente N fotones ópticos en cada una de las dos bandas laterales. Esto significa que en la salida del transductor, la señal de microondas de entrada no se amplifica. Además, el procedimiento utiliza el modo de ondas viajeras para mezclar las señales del bombeo óptico y las microondas. Por el contrario, las soluciones conocidas usan oscilaciones resonantes. Se debe tener en cuenta que antes de detectar la señal de ralenti, es beneficioso filtrar primero la señal de la bomba de salida óptica S_{pi_out1} . Para este propósito, se puede usar un filtro de paso de banda óptico, o la dirección de propagación de la señal local se puede hacer diferente de la dirección de propagación de la señal del bombeo óptico para separar las ondas en el espacio. Si esta operación no se lleva a cabo, a continuación la señal de ralenti podría ser difícil de resolver junto a la señal del bombeo óptico en el detector 53.

La Figura 7 muestra esquemáticamente cómo evolucionan las formas de onda de la señal dentro del medio no lineal 13, 27 y cómo se genera la señal de ralenti durante la amplificación paramétrica en el escenario de la Figura 5. Como se puede observar, la señal de bomba de entrada óptica S_{pi_in1} disminuye dentro del medio no lineal. En otras palabras, la señal de bomba de salida óptica S_{pi_out1} tiene menos energía, es decir, un menor número de fotones en comparación con la señal de bomba de entrada óptica S_{pi_in1} . Además, la señal de la bomba de entrada óptica tiene muchos más fotones que la señal de entrada de microondas S_{in2} . Como también se puede observar en la Figura 7, la señal de microondas se amplifica cuando viaja a través de la guía de ondas de microondas 15, lo que significa que aumenta su número de fotones. La señal de ralenti, que está en el dominio óptico, es el producto de mezcla de las señales ópticas y de microondas. Debe observarse que hay un fotón inactivo por cada fotón de microondas adicional cuando la señal de microondas se amplifica entre el puerto de entrada de microondas 5 y el puerto de salida de microondas en el

material no lineal en el transductor 1. Cuando se amplifica una señal, se añaden fotones a la señal a su frecuencia de señal. Por lo tanto, cuando una señal de entrada de microondas con un fotón se amplifica en 20db (x100) entre los puertos de entrada y de salida, obtenemos 100 fotones de microondas en la salida y 99 fotones inactivos a la frecuencia óptica Ω_2 . La solución según la presente invención no utiliza la señal de microondas amplificada *per se*, sino que la señal de ralentí se utiliza en su lugar para detectar indirectamente la señal de entrada de microondas. La señal de ralentí solo se genera como resultado del procedimiento de amplificación paramétrica. La señal de ralentí se genera por la interacción de la señal de microondas, la señal de la bomba y el medio no lineal (idealmente un material que tenga una no linealidad de segundo orden). Sin embargo, como se mencionó anteriormente, también se puede usar un material no lineal de tercer orden mediante la combinación de múltiples señales de bomba (óptica y/o de microondas y/o corriente CC).

La Figura 8 ilustra esquemáticamente el sistema de detección de señales de microondas 50 o un entorno, donde pueden aplicarse las enseñanzas de la presente invención. En este ejemplo, el aparato 1, que por lo tanto funciona como un transductor de fotones de microondas a óptico, se coloca en un entorno criogénico. Más específicamente, el aparato se coloca en una cámara criogénica 51, que puede tener una temperatura inferior a -200 °C. La cámara criogénica también aloja una etapa de microondas que incluye circuitos de microondas, que están acoplados al transductor 1. El transductor 1 está conectado al sensor 53, que está configurado para medir la llegada de fotones ópticos, a través de un canal óptico 55 y de modo que el canal óptico pasa a través de diferentes cámaras de temperatura 57 a diferentes temperaturas de modo que la temperatura aumenta gradualmente desde el transductor 1 hacia el sensor 53. El transductor 1 está configurado para transducir la señal de entrada de microondas en el dominio óptico como la señal o señales de ralentí, que viajan a través del canal óptico al sensor para ser leídas ópticamente. El ejemplo de la Figura 8 simplemente muestra tres cámaras de temperatura 57, pero el número de cámaras no se limita a tres. En este ejemplo, el sensor 53 es un fotodetector óptico, que en este ejemplo está a temperatura ambiente, aunque la temperatura del detector puede diferir de la temperatura ambiente. Además, en este ejemplo, se obtiene una señal de voltaje en la salida del fotodetector 53, donde la señal de voltaje es proporcional a la potencia de microondas incidente en la entrada del transductor.

La Figura 9 muestra esquemáticamente una disposición apilada de una unidad de circuito de microondas 59 y un conjunto de transductores 1, mientras que la Figura 10 muestra esquemáticamente una disposición de una sola capa de la unidad de circuito de microondas 59 y el conjunto de transductores 1. El conjunto de transductores en este ejemplo comprende una pluralidad de transductores 1. Como se muestra, el conjunto de transductores 1 y la unidad de circuito de microondas 59 se colocan en una carcasa o soporte 61. Hay muchas formas posibles de acoplar los circuitos de microondas a los transductores, tales como mediante el uso de: unión directa de cables; la misma fabricación de chips; otro conjunto electrónico conocido, incluido el chip invertido, o a través de vías de obleas; y guía de ondas acoplada. El uso de la conexión de guía de ondas acoplada implicaría colocar la guía de ondas de salida del circuito de microondas junto a la guía de ondas de microondas del transductor 15, mediante el uso de una conexión de campo cercano, que es un acoplamiento capacitivo y/o inductivo. La señal u onda cambiaría de una guía de onda a la otra (en una técnica conocida también como acoplador de interacción). Cuanto menor sea la distancia entre los circuitos de microondas y los transductores 1, menor será la pérdida de señal en las entradas de los transductores. Con respecto a toda la arquitectura del sistema, se puede proporcionar una antena (no mostrada en los dibujos) para recibir señales inalámbricas. La antena puede a continuación acoplarse a los circuitos de microondas (que pueden, por ejemplo, hacer filtrado de señal), que están conectados además a los sensores 53 a través de los canales ópticos 55. Este tipo de arquitectura de sistema podría usarse, por ejemplo, en aplicaciones de radar o imágenes médicas, como en imágenes de resonancia magnética (MRI). Cabe señalar que en algunas aplicaciones, la antena puede omitirse. En estos casos, los circuitos de microondas se pueden usar para generar fotones de microondas que a continuación se alimentan a los transductores 1. El sistema, como se muestra en las Figuras 9 y 10, también se puede utilizar para conectar un conjunto de procesamiento central (CPU) clásico y un coprocesador cuántico dentro de un acelerador cuántico.

Existen varias formas de crear los espacios fotónicos como se explica a continuación. Por ejemplo, como se muestra en la Figura 11A, el espacio fotónico puede crearse al tener orificios 31, que se repiten periódicamente, y que pueden ser orificios pasantes u orificios ciegos, en la guía de ondas óptica 13. La sección transversal de los orificios puede tener varias formas (incluso dentro de una sola guía de ondas), pero deben repetirse periódicamente. Sin embargo, lo ideal es que los orificios tengan el mismo factor de forma (ancho/largo/grosor) para obtener un espacio fotónico perfecto. Si la guía de ondas óptica 13 comprende tanto los componentes no lineales como lineales 27, 29, a continuación los orificios se realizan ventajosamente en el componente lineal 29. Sin embargo, sería posible hacerlos en su lugar (o además) en el componente no lineal 27. Por lo tanto, en la configuración de la Figura 11A, la estructura periódica está formada por los orificios 31. La Figura 11B ilustra otro ejemplo de la estructura periódica, que en este ejemplo se coloca en la superficie de la guía de ondas óptica 13. En este ejemplo, la estructura periódica está hecha de bloques o parches 33, que pueden ser de un material diferente al material no lineal y/o lineal de la guía de ondas óptica 13. Por ejemplo, el material de la estructura periódica podría tener un índice de refracción más alto o más bajo que el del material no lineal de la guía de ondas óptica 13, que puede estar hecho, por ejemplo, de cualquier material mencionado anteriormente, como el silicio. La estructura periódica puede tener cualquier forma, siempre que la estructura añadida sea periódica. De manera ventajosa, la guía de ondas óptica tendría la estructura periódica en una o más de sus superficies externas a lo largo de toda, o sustancialmente toda, la longitud de la guía de ondas óptica 13. Otra forma más de implementar el espacio fotónico es crear orificios periódicos 31 fuera de la guía de ondas óptica

13, pero en su proximidad, como se muestra en la Figura 11C. Esta configuración sería factible si el dieléctrico alrededor de la guía de ondas óptica está hecho de material sólido. Esto cambiaría el índice de refracción efectivo aparente del material de la guía de ondas óptica 13. Aquí de nuevo, los orificios pueden ser orificios pasantes u orificios ciegos y tener cualquier sección transversal deseada, siempre que los orificios estén dispuestos periódicamente. En el ejemplo de la Figura 11D, el cambio periódico de la sección transversal de la guía de ondas se utiliza para crear diferentes índices de refracción efectivos. Los cambios periódicos pueden obtenerse mediante corrugaciones, por ejemplo. Esta configuración es equivalente a tener orificios en la parte exterior de la guía de ondas.

La Figura 11e muestra una vista superior del componente óptico integrado de la Figura 11D para una aplicación de supresión de frecuencia altamente efectiva para operar como un filtro de supresión de frecuencia. El componente funciona evitando la generación de señales ópticas a la frecuencia no deseada (también llamada frecuencia de Bragg) dentro de la guía de ondas óptica. La idea general de este componente se basa en una guía de ondas que exhibe una geometría periódicamente alterna como se presenta en las Figuras 11a a 11d. La frecuencia de Bragg se puede ajustar cambiando el ancho de la corrugación de la guía de ondas (primer ancho de sección transversal o mayor w_1 , y un segundo ancho de sección transversal o menor w_2 como se muestra en la Figura 11e) y su periodicidad A .

La efectividad del componente presentado se mide por su función de nitidez δf que definimos como una diferencia en el dominio de frecuencia entre puntos que dan valores de reflexión iguales a 95 % y 5 % ($\delta f = f(R95\%) - f(R5\%)$, donde R denota reflexión). El componente fotónico (u óptico) que presentamos aquí muestra una alta efectividad, ya que es capaz de alcanzar $\delta f < \Omega_1$, donde Ω_1 es la frecuencia de la señal de entrada de microondas.

Para lograr una mejor nitidez (es decir, valores bajos de δf), es necesario tener la estructura (es decir, la guía de ondas) lo más larga posible, es decir, $N \gg 1$, donde N es el número de corrugaciones o elementos periódicos, porque el valor de δf disminuye rápidamente como una ley de potencia de N^{-3} .

El modo de funcionamiento preferido para la guía de ondas óptica es el uso del modo TE0, ya que las restricciones de fabricación existentes dan un mayor grado de libertad para variar n_{eff1} , n_{eff2} alternando w_1 y w_2 . Cabe señalar que TE0 es un término utilizado para describir la orientación del campo eléctrico dentro de las guías de ondas. TE0 significa que: a) el campo eléctrico oscila horizontalmente dentro de la sección transversal de la guía de ondas (TE); y b) la distribución de amplitud del campo eléctrico es una función de coseno con un valor máximo en el centro de la sección transversal de la guía de ondas (TE0). n_{eff1} y n_{eff2} son los índices de refracción efectivos de la guía de ondas debido a la geometría corrugada con anchos w_1 y w_2 . Usamos corrugaciones periódicas para obtener valores periódicos de n_{eff1} , n_{eff2} para obtener espacios fotónicos como se describió anteriormente. Además, también es preferible tener una gran diferencia $w = w_1 - w_2$ ya que esto también se traduce en una gran diferencia en los índices de refracción efectivos $\Delta n = n_{eff1} - n_{eff2}$. Un valor mayor de Δn da como resultado una mayor nitidez (es decir, menor δf). Sin embargo, se debe garantizar un cierto equilibrio: w_1 solo se puede aumentar hasta el punto en que la guía de ondas comience a funcionar en un régimen de modos múltiples. Este punto multimodo régimen se define por la longitud de onda de entrada λ elegida, su polarización, la geometría de la guía de ondas (ancho y espesor) y el material. Por lo tanto, con el fin de evitar alcanzar el punto de régimen multimodo, se tiene que disminuir el espesor de la guía de ondas, su anchura y su apertura numérica, y aumentar A . La apertura numérica (NA) se define como el intervalo de ángulos de propagación óptica que un componente óptico puede aceptar. La NA es proporcional a la diferencia en los índices de refracción del núcleo de una guía de ondas y de su revestimiento. La NA puede disminuirse eligiendo un material de revestimiento que tenga su valor de índice de refracción cercano pero no superior al índice de refracción de la guía de ondas. El mismo criterio se aplica a w_2 . Sin embargo, en cuanto a w_2 , no se puede configurar para que sea demasiado bajo, ya que el modo ya no se guiaría. Los límites de ancho se establecen para que estén aproximadamente entre $w_{min} \sim \lambda/5$ y $w_{max} \sim \lambda/1.5$. Estos límites aseguran que, por un lado, el modo esté confinado y se propague dentro de la guía de ondas y, por otro lado, se preserve el régimen de modo TE0 único. Además, la guía de ondas debe diseñarse para evitar el efecto de cierre del espacio de banda que hace que el efecto de filtrado desaparezca. Esto ocurre aproximadamente cuando $w_1 - w_2 \sim A/3$. La guía de ondas de cristal fotónico presentada aquí tiene la ventaja de que su ancho de banda de filtrado puede ser tan bajo como la frecuencia de microondas Ω_1 . A continuación, se proporcionan los posibles intervalos de valores para algunos de los parámetros anteriores.

Intervalos de N :

- Intervalo extendido: $10 < N < 100'000$;
- Intervalo N aceptable: $100 < N < 100'000$; e
- Intervalo N ideal: $1000 < N < 100'000$ (En $N=1000$, la nitidez del 5-95 % es aproximadamente $\delta f = \text{GHz}$, que se considera un rendimiento superior a la media).

Intervalos de ancho:

- Intervalo extendido: $300 \text{ nm} < w_2 < 600 \text{ nm}$, $800 \text{ nm} < w_1 < 1200 \text{ nm}$;
- Intervalo aceptable: $400 \text{ nm} < w_2 < 600 \text{ nm}$, $800 \text{ nm} < w_1 < 1000 \text{ nm}$; e
- Intervalo ideal: $500 \text{ nm} < w_2 < 600 \text{ nm}$, $800 \text{ nm} < w_1 < 900 \text{ nm}$.

Intervalos de Δn :

- Intervalo extendido: $0,001 < \Delta n < 2$;
- Intervalo aceptable: $0,01 < \Delta n < 2$; e
- Intervalo ideal: $0,1 < \Delta n < 2$.

Para todos los diseños de ejemplo mostrados en las Figuras 11a a 11e, la distancia entre los patrones periódicos en la estructura define la ubicación y el tamaño del espacio fotónico. La posición del espacio fotónico en el dominio de la frecuencia es inversamente proporcional al período de la estructura. Con dicha estructura periódica, que por lo tanto genera típicamente una pluralidad de espacios fotónicos a diferentes frecuencias, la guía de ondas óptica 15 se denomina cristal fotónico no lineal.

Para garantizar que las ondas de microondas y ópticas viajeras puedan interactuar de manera eficiente (es decir, las velocidades de grupo de las ondas están casi igualadas), y que la interacción resultante de diferentes secciones de las guías de ondas 13, 15 se agrega de manera constructiva, se introducen alteraciones periódicas en la guía de ondas óptica 13 y/o la guía de ondas de microondas 15. Las posibles alteraciones incluyen, pero no se limitan a, cualquiera de los siguientes, y combinaciones de los mismos: líneas de retardo (se pueden aplicar a una cualquiera o ambas de las guías de ondas de microondas y ópticas), resonadores acoplados (se pueden aplicar a la guía de ondas de microondas), modificaciones locales de las geometrías de la guía de ondas (se pueden aplicar a una cualquiera o ambas de las guías de ondas de microondas y ópticas), modificaciones locales de los coeficientes de acoplamiento (se pueden aplicar a una cualquiera o ambas de las guías de ondas de microondas y ópticas), modificaciones locales del índice de refracción (se pueden aplicar a una cualquiera o ambas de las guías de ondas de microondas y ópticas), y estructura con polos periódicos (se puede aplicar a la guía de ondas óptica). Cabe señalar que la alteración "modificaciones locales de los coeficientes de acoplamiento" representa una generalización de la estructura periódicamente polarizada. La idea es cambiar localmente el tensor electroóptico efectivo r . Los procedimientos de coincidencia de fase pueden usarse para mejorar la sincronización de las señales de microondas y ópticas, como se explica más adelante con más detalle. Las alteraciones periódicas se ilustran esquemáticamente en la Figura 12. Como se puede observar, en este ejemplo, tanto las guías de ondas ópticas como las de microondas 13, 15 se dividen en dos tipos de segmentos, el primero se denomina segmentos de interacción 35, y el segundo se denomina segmentos de alteración 37. La combinación de un segmento de interacción y un segmento de alteración adyacente forma un dominio D. La longitud del dominio L_D es idealmente la misma para las guías de ondas ópticas y de microondas 13, 15. En un segmento de alteración 37, la interacción se altera, mientras que no tiene lugar ninguna alteración en un segmento de interacción 35. Se debe tener en cuenta que la interacción tiene lugar a lo largo de toda la longitud de la zona de interacción L. En este ejemplo, los dominios se disponen periódicamente sin separación entre ellos como se muestra en la Figura 12, con la longitud del período correspondiente a L_D , donde $L_D = \alpha \times \lambda/4$, donde α es un número entero positivo y λ es la longitud de onda de la señal de entrada de microondas S_{in2} . En otras palabras, la longitud del dominio es un múltiplo de un cuarto de la longitud de onda de las microondas. La estructura general de los dominios combinados está diseñada para lograr coincidencia de fase o coincidencia de cuasifase (QPM) a lo largo de la longitud de interacción L.

Antes de describir algunas de las opciones de alteración con más detalle, primero se ilustra con referencia a las Figuras 13 y 14 por qué es beneficioso implementar la coincidencia de fase en el transductor 1. La Figura 13 muestra ejemplos de microondas y señales ópticas en el dominio del tiempo, mientras que la Figura 14 muestra el resultado de la integración de estas señales. El eje y en las Figuras 13 y 14 representa la amplitud de la señal, mientras que el eje x representa la distancia de propagación a lo largo de la guía de ondas. g_0 denota la suma de la integral en las zonas de interacción y alteración, en otras palabras, la suma de la multiplicación de los niveles de señal óptica y de microondas en un dominio D. Como se muestra en la Figura 14, si no se lleva a cabo la coincidencia de fase, a continuación las integrales serían aproximadamente el 50 % del tiempo positivas (cuando el campo eléctrico de microondas sería positivo) y aproximadamente el 50 % del tiempo negativas (cuando el campo eléctrico de microondas sería negativo), y el resultado final en todo el dominio D (es decir, la zona de interacción y alteración) sería aproximadamente 0, es decir, $g_0 = 0$. Esto significa que no habría ninguna interacción o que la cantidad de la interacción sería muy pequeña. Para tener un resultado de integración distinto de cero, se utiliza ventajosamente la coincidencia de fases.

La estructura periódicamente polarizada en el material no lineal puede obtenerse, por ejemplo, aplicando alta tensión durante un período de tiempo determinado en las ubicaciones deseadas en el material no lineal o cambiando la temperatura localmente en las ubicaciones deseadas. De esta manera, se puede obtener un cambio del signo del coeficiente electroóptico (o tensor de material) en las ubicaciones deseadas en el material no lineal a lo largo del eje de propagación del material. Más específicamente, de esta manera, el signo del coeficiente electroóptico se puede alternar periódicamente a lo largo del eje de propagación del material. Como resultado, como se muestra en la Figura 15 (donde el eje x representa el tiempo mientras que el eje y representa la amplitud), la suma de la integral de la señal resultante no será cero, lo que conducirá a la interacción deseada. Esto puede explicarse por el hecho de que para un material no lineal, g_0 es proporcional a la suma de la integral de

$$\int_D \epsilon_{ik} \epsilon_{jl} r_{klm}^{(eff)} E_b^m(\omega_b) E_a^i(\omega_a) E_a^j(\omega_a) dD$$
, pero dado que la señal de microondas es sinusoidal, E_b es positiva en una mitad del dominio D y negativa en la otra mitad. A continuación, mediante el uso de una estructura

de polos periódicamente adecuada, el r_{klm} tensor se vuelve negativo para la parte del dominio donde E_b^m es negativo, lo que resulta en una integral distinta de cero.

Si se modifica la geometría de una guía de ondas, esto se puede implementar, por ejemplo, modificando la forma de la guía de ondas para cambiar la fuerza de acoplamiento de la interacción electroóptica. Por ejemplo, típicamente para reducir la interacción, la guía de ondas respectiva debe hacerse más grande, y para aumentar la interacción, la guía de ondas debe hacerse más pequeña. Cabe señalar que el tensor electroóptico es la propiedad del material que describe la interacción entre las señales de microondas y las señales ópticas. La Figura 16 ilustra una situación en la que se han cambiado las geometrías de las microondas y de la guía de ondas óptica (el eje x representa nuevamente la distancia de propagación a lo largo de la guía de ondas y el eje y representa la amplitud de la señal). Como resultado, la suma de la integral de la señal resultante no será cero, lo que conducirá a la interacción deseada. Esto se logra de modo que el posicionamiento (es decir, la distancia) y/o el tamaño y/o la forma de las microondas y las guías de ondas ópticas estén diseñados de modo que para una de las alternancias de la señal de microondas (negativa en la Figura 16) haya una fuerza de acoplamiento mínima de la interacción electroóptica en el material no lineal. En la práctica, por ejemplo, las guías de ondas se encontrarán más cerca y más lejos entre sí a una periodicidad cercana a la longitud de onda de la señal de microondas.

Si se utilizan resonadores acoplados, a continuación esto se puede implementar mediante el uso de resonadores de microondas acoplados. Más específicamente, el cambio requerido en la fase para la coincidencia de fase o la coincidencia de cuasifase de la propagación de microondas se puede lograr acoplando periódicamente la guía de ondas de microondas a los resonadores de microondas. Estos resonadores también determinarían el ancho de banda de la trayectoria de la señal de microondas. En la práctica, los resonadores de microondas acoplados se pueden implementar fácilmente utilizando la opción 1 o la opción 2. De acuerdo con la opción 1, un circuito LC paralelo (donde L denota un inductor, y C denota un condensador) como se muestra en la Figura 17 o un circuito RLC (donde R denota una resistencia) como se muestra en la Figura 18 se coloca junto a la guía de ondas de microondas 15, de modo que se acopla capacitiva o inductivamente a la guía de ondas. Los inductores y condensadores pueden estar hechos de componentes discretos o directamente en un chip con líneas de metal y un dieléctrico. De acuerdo con la opción 2, se usa un resonador de microondas distribuido, o un resonador de microondas de tipo guía de ondas, donde el resonador de microondas de tipo guía de ondas puede implementarse usando una línea de transmisión con un extremo abierto o cortocircuitado, o material dieléctrico dispuesto junto a la guía de ondas respectiva 13, 15.

El resonador de microondas distribuido de acuerdo con la opción 2 se explica a continuación con más detalle con ilustraciones en las Figuras 19 a 21. La Figura 19 representa la configuración de la Figura 4c, donde la guía de ondas óptica 13 se encuentra entre el primer y segundo electrodos 19, 21. El resonador de microondas distribuido se obtiene en este ejemplo modificando uno o ambos electrodos superconductores como se muestra en la Figura 20. Más específicamente, la modificación se puede realizar cortando algunas partes del electrodo respectivo 19, 21. La Figura 21 muestra cómo se pueden modificar los electrodos en la configuración de la Figura 4f. En este ejemplo, solo se modifica el electrodo medio 21, pero dos de ellos o todos ellos podrían modificarse en su lugar. Cabe señalar que las regiones sobrantes del electrodo funcionan como resonadores de microondas distribuidos. Idealmente, estas regiones se ubican de manera que la alteración resultante tenga lugar periódicamente, dando como resultado una alteración adecuada de la onda progresiva, por ejemplo, como se muestra en la Figura 16.

Anteriormente se propone un nuevo transductor de fotones de microondas a óptico 1. El transductor está diseñado de tal manera que el flujo de fotones ópticos de salida (es decir, el número de fotones por unidad de tiempo, tal como un segundo) en la(s) banda(s) lateral(es) óptica(s) es linealmente proporcional al flujo de fotones de microondas de entrada. Por lo tanto, tenemos una transducción con una amplificación lineal del número de fotones, es decir, el número de fotones en la(s) señal(es) óptica(s) de banda lateral es igual al número de fotones en la señal de entrada de microondas multiplicado por la ganancia del transductor. En otras palabras, el número de fotones de la señal o señales ópticas de inactividad depende linealmente del número de fotones de entrada de microondas. Según la primera realización, la propia señal de microondas se amplifica en el material no lineal, mientras que según la segunda realización, la señal de microondas cuando se considera en la salida del transductor no se modifica por la interacción con la señal del bombeo óptico.

REIVINDICACIONES

1. Un transductor de fotones de microondas a óptico (1) para proporcionar acoplamiento entre al menos una señal de microondas (S_{in2}) y una señal óptica (S_{pi_in1} , S_{pi_out1}), comprendiendo el transductor (1):

- un primer puerto de entrada (3) para recibir la señal óptica (S_{pi_in1}),
- un segundo puerto de entrada (5) para recibir la señal de microondas (S_{in2});
- un primer puerto de salida (9) para emitir la señal óptica (S_{pi_out1}) y una o más señales de banda lateral óptica (S_{out1} , S_{out11} , S_{out12});
- una primera guía de ondas (13) dispuesta entre el primer puerto de entrada (3) y el primer puerto de salida (9) para permitir que la señal óptica (S_{pi_in1}) y la una o más señales de banda lateral óptica (S_{out1} , S_{out11} , S_{out12}) se propaguen en la primera guía de ondas (13);
- una segunda guía de ondas (15) conectada al segundo puerto de entrada (5), y que se extiende en el transductor (1) adyacente a la primera guía de ondas (13) para permitir que la señal de microondas (S_{in2}) se propague en la segunda guía de ondas (15);
- una disposición de coincidencia de fase (37) para hacer que al menos la señal óptica (S_{pi_in1}) en la primera guía de ondas (13) y la señal de microondas (S_{in2}) en la segunda guía de ondas (15) coincidan en fase o casi en fase, en donde la primera guía de ondas (13) está hecha de, o la primera guía de ondas (13) comprende material no lineal de modo que un primer campo electromagnético generado por la señal óptica (S_{pi_in1}) en la primera guía de ondas (13) y un segundo campo electromagnético generado por la señal de microondas (S_{in2}) en la segunda guía de ondas (15) están dispuestos para interactuar y superponerse en el material no lineal, el transductor de fotones de microondas a óptico (1) se **caracteriza porque** el transductor de fotones de microondas a óptico (1) está configurado para usar ondas viajeras para mezclar la señal de microondas (S_{in2}) y la señal óptica (S_{pi_in1} , S_{pi_out1}) para permitir que las una o más señales de banda lateral óptica (S_{out1} , S_{out11} , S_{out12}) se detecten en el primer puerto de salida (9) para permitir que la potencia de la señal de microondas (S_{in2}) en el segundo puerto de entrada (5) se determine en función de las una o más señales de banda lateral detectadas (S_{out1} , S_{out11} , S_{out12}).

2. El transductor (1) según la reivindicación 1, donde el material no lineal tiene al menos una no linealidad de segundo orden capaz de generar la una o más señales de banda lateral (S_{out1} , S_{out11} , S_{out12}) como una señal de frecuencia suma y/o una señal de frecuencia diferencia del primer y segundo campos electromagnéticos.

3. El transductor (1) según la reivindicación 1 o 2, en el que la segunda guía de ondas (15) comprende al menos un primer electrodo (19) y un segundo electrodo (21) separados del primer electrodo (19) por un dieléctrico.

4. El transductor (1) según la reivindicación 3, donde la primera guía de ondas (13) está dispuesta entre el primer electrodo (19) y el segundo electrodo (21), o donde el primer y el segundo electrodo (19, 21) están dispuestos en un lado de la primera guía de ondas (13).

5. El transductor (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el transductor (1) comprende además una fuente de bomba para generar la señal óptica (S_{pi_in1}).

6. El transductor (1) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el transductor (1) comprende además un segundo puerto de salida (11) conectado a la segunda guía de ondas (15), y donde la segunda guía de ondas (15) se extiende entre el segundo puerto de entrada (5) y el segundo puerto de salida (11).

7. El transductor (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la primera guía de ondas (13) comprende un componente no lineal (27) que comprende el material no lineal, y un componente lineal (29) que comprende material lineal.

8. El transductor (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el transductor (1) comprende además una estructura periódica (31, 33) al menos dentro de la primera guía de ondas (13) y/o en su superficie y/o fuera de ella para crear al menos un espacio de banda fotónica.

9. El transductor (1) según la reivindicación 8, donde el material no lineal tiene al menos una no linealidad de segundo orden capaz de generar una señal de banda lateral inferior (S_{out11}) como una señal de diferencia de frecuencia del primer y segundo campos electromagnéticos, y una señal de banda lateral superior (S_{out12}) como una señal de suma de frecuencia del primer y segundo campos electromagnéticos, y donde la estructura periódica (31, 33) está configurada de modo que la señal de banda lateral superior caiga en al menos un espacio de banda fotónica.

10. El transductor (1) según una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 9, donde la estructura periódica (31, 33) comprende un conjunto periódico de orificios (31) dentro de la primera guía de ondas (13) y/o fuera de ella, y/o la estructura periódica (31, 33) comprende un conjunto periódico de bloques (33) en la primera guía de ondas (13), y/o la estructura periódica está formada por una sección transversal periódicamente variada de la primera guía de ondas (13) a lo largo de un eje longitudinal de la primera guía de ondas (13).

- 5 11. El transductor (1) según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, en el que la estructura periódica (31, 33) comprende elementos dispuestos a intervalos predefinidos, y en el que una dimensión de los elementos sustancialmente ortogonal a un eje longitudinal de la primera guía de ondas (13) está en el intervalo de 0,1 μm a 10 μm , o más específicamente en el intervalo de 0,5 μm a 5 μm .
12. El transductor (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la disposición de coincidencia de fase (37) está colocada dentro de al menos una de la primera y segunda guías de ondas (13, 15) o conectada capacitivamente a la segunda guía de ondas (15).
- 10 13. El transductor (1) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la disposición de coincidencia de fase (37) comprende al menos uno cualquiera de los siguientes medios: una o más líneas de retardo, uno o más resonadores acoplados, una distancia que varía periódicamente entre la primera y la segunda guía de ondas (13, 15), un tamaño que varía periódicamente de al menos una de la primera y la segunda guía de ondas (13, 15), modificaciones locales del índice de refracción y una estructura de polos periódicamente.
- 15 14. Un sistema de detección de señal de microondas (50) que comprende el transductor (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores y que comprende además un sensor (53) acoplado directa o indirectamente al primer puerto de salida (9) para detectar la una o más señales de banda lateral óptica ($S_{\text{out}1}$, $S_{\text{out}11}$, $S_{\text{out}12}$) para detectar la señal de microondas en el segundo puerto de entrada (5).
- 20 15. Un procedimiento de funcionamiento del sistema de detección de señal de microondas (50) de la reivindicación 14, comprendiendo el procedimiento:
- 25 • aplicar simultáneamente la señal óptica ($S_{\text{pi\_in}1}$) al primer puerto de entrada (3) y la señal de microondas ($S_{\text{in}2}$) al segundo puerto de entrada (5);
- detectar la una o más señales de banda lateral ($S_{\text{out}1}$, $S_{\text{out}11}$, $S_{\text{out}12}$); y
- determinar la potencia de la señal de microondas ($S_{\text{in}2}$) en el segundo puerto de entrada (5) en función de las una o más señales de banda lateral detectadas ($S_{\text{out}1}$, $S_{\text{out}11}$, $S_{\text{out}12}$).

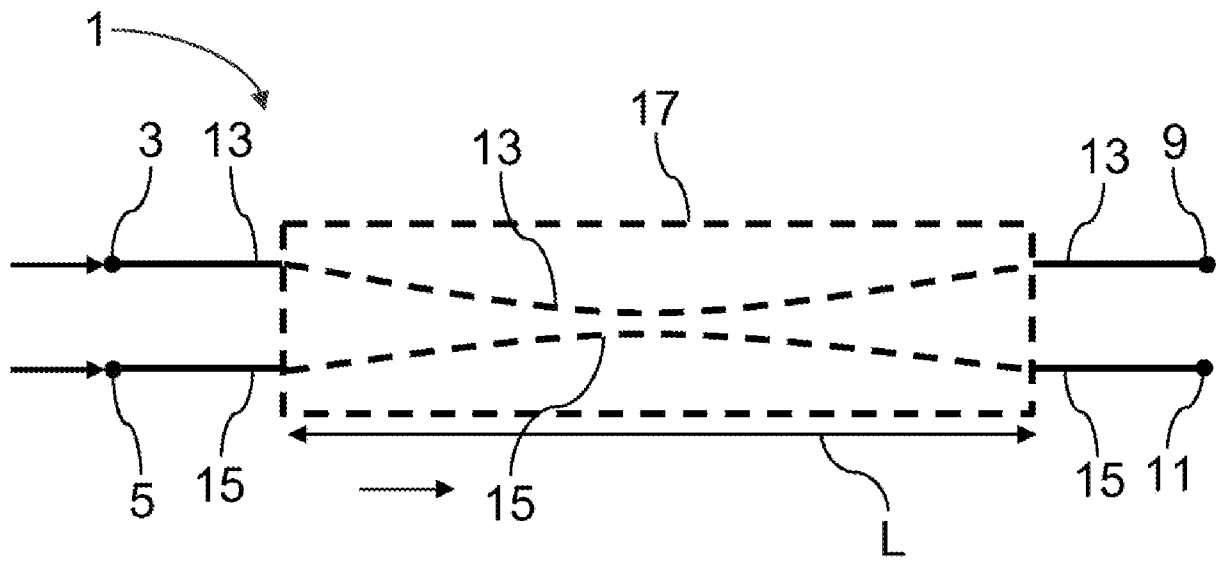


Fig. 1

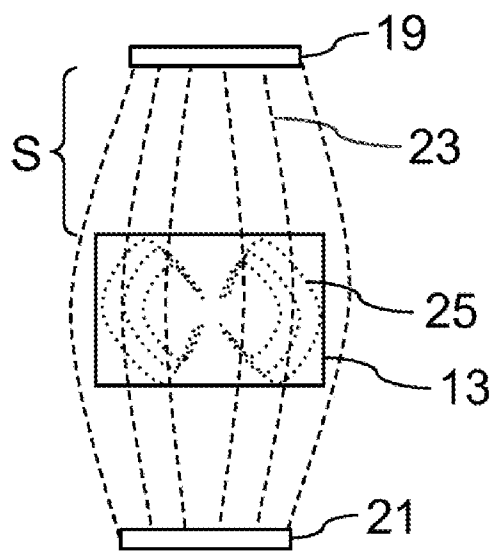


Fig. 2

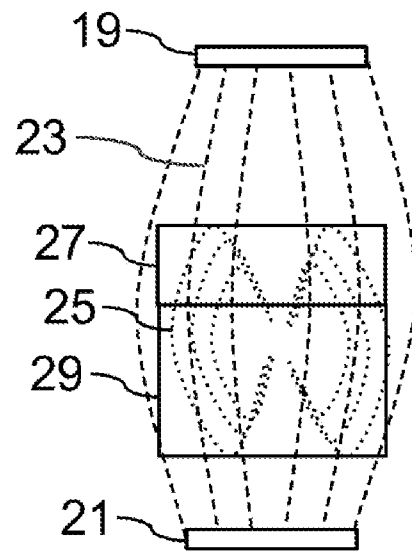
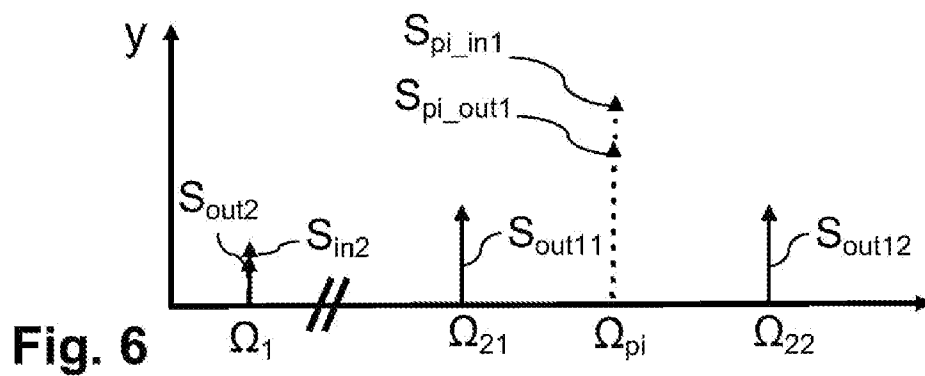
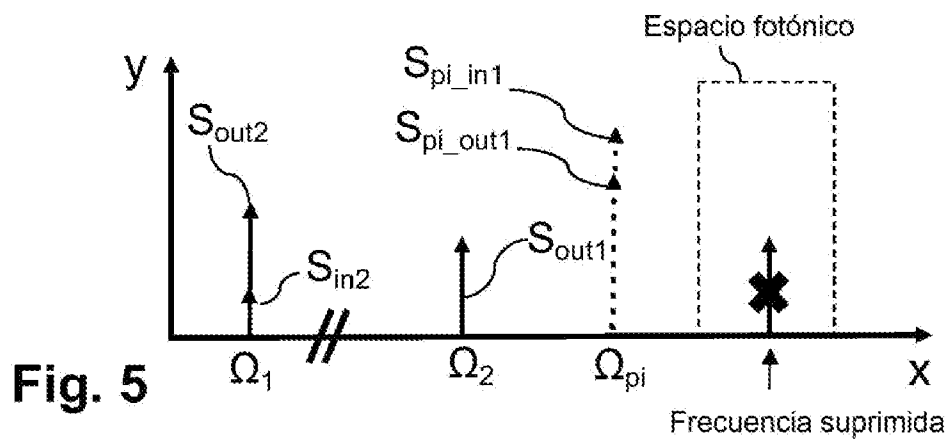
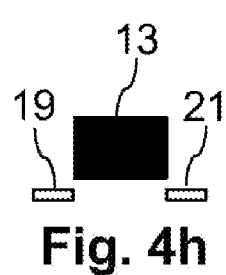
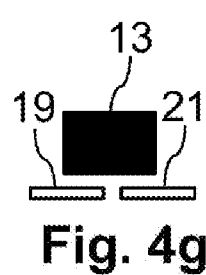
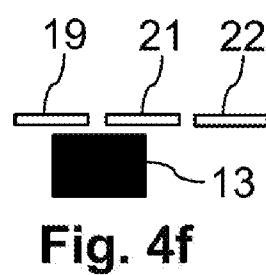
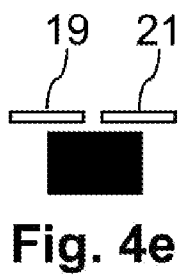
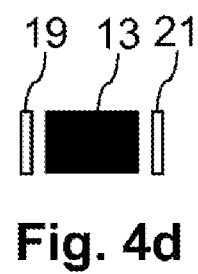
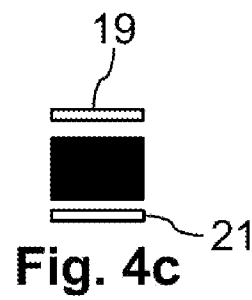
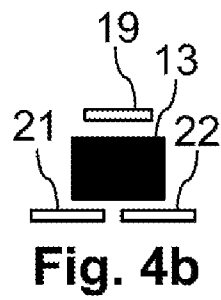
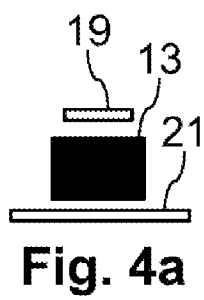


Fig. 3



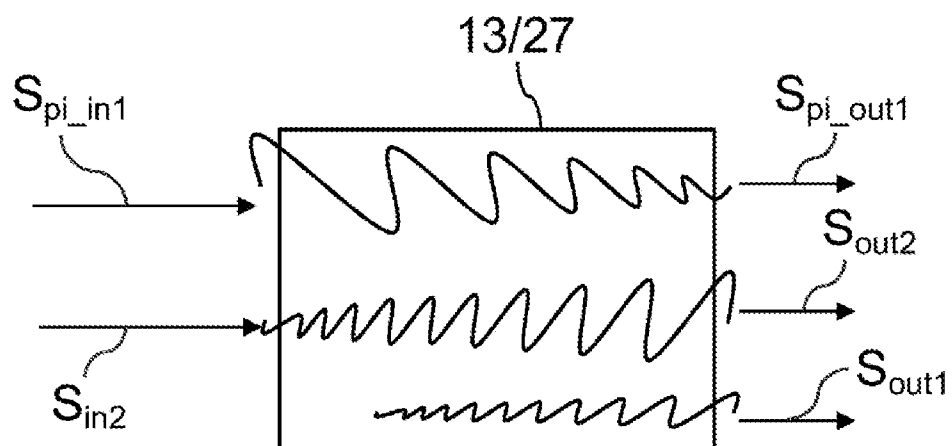


Fig. 7

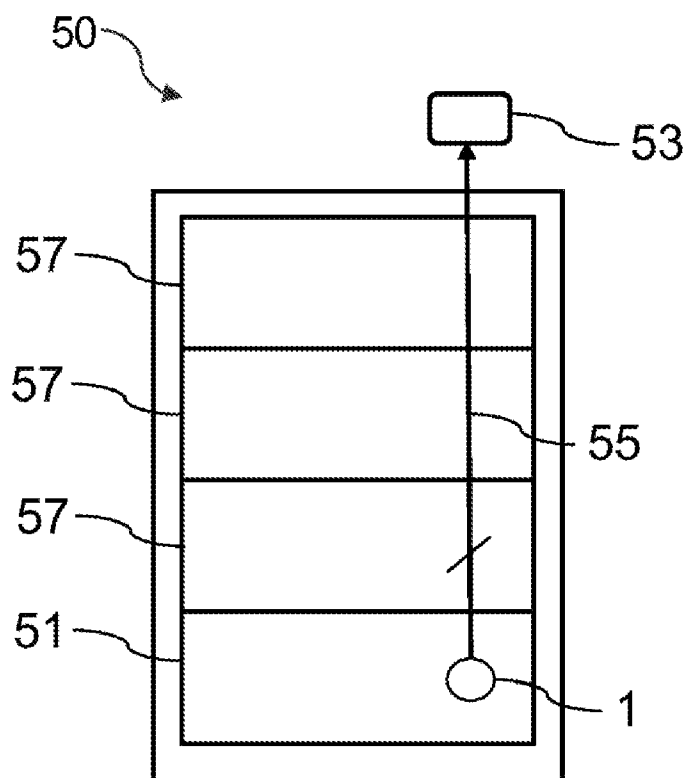
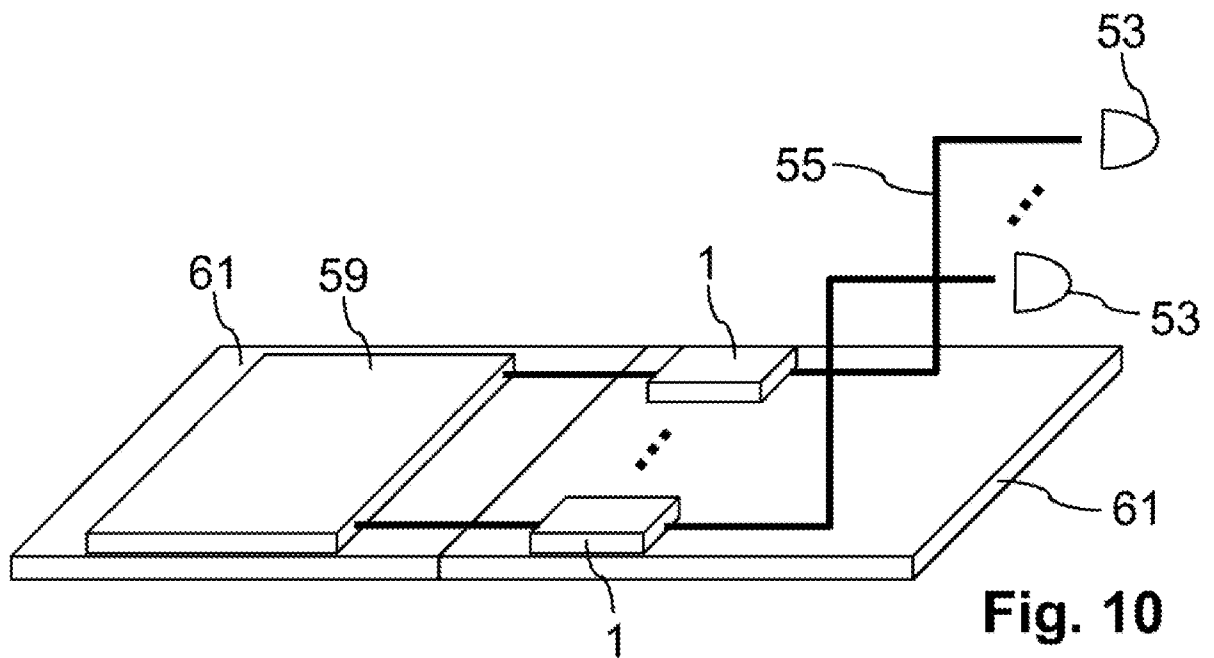
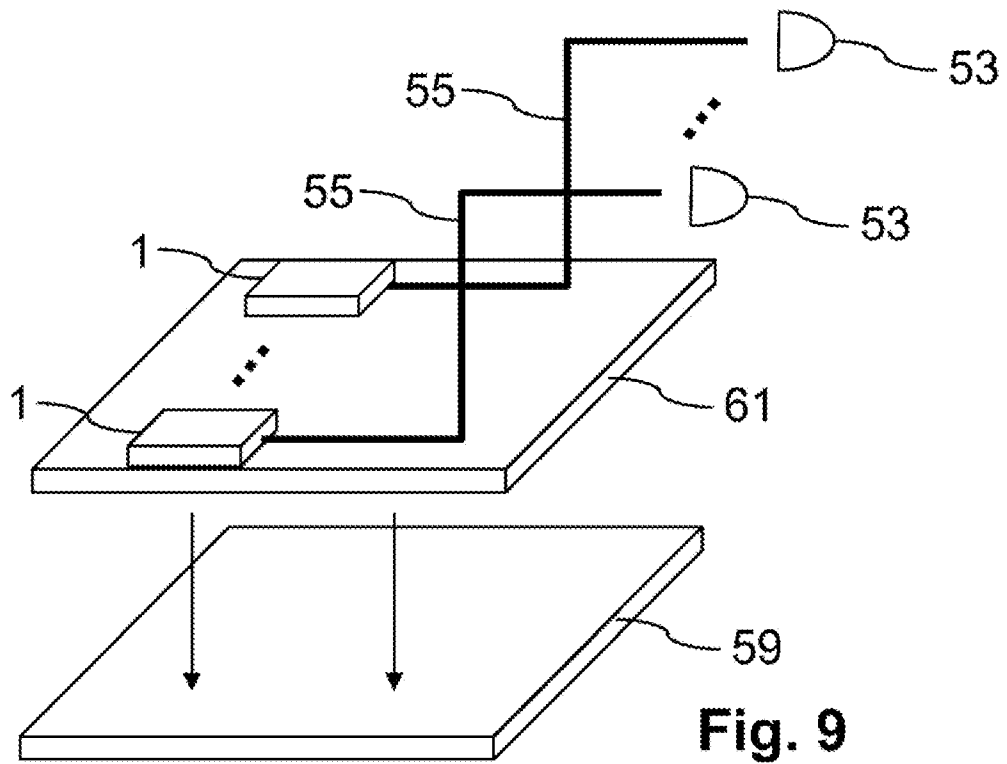


Fig. 8



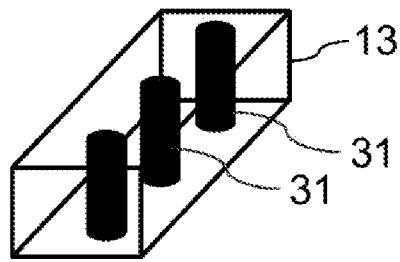


Fig. 11a

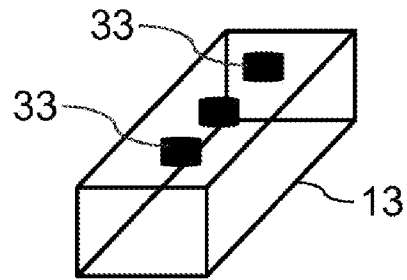


Fig. 11b

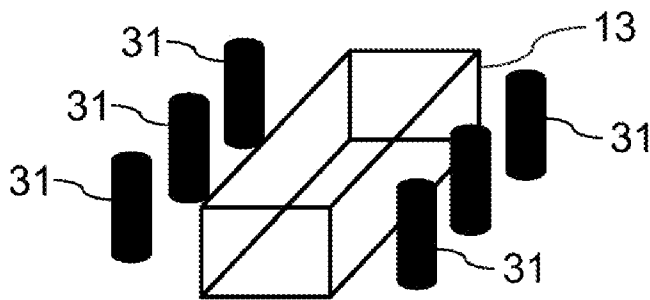


Fig. 11c

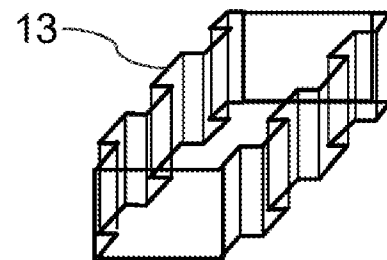


Fig. 11d

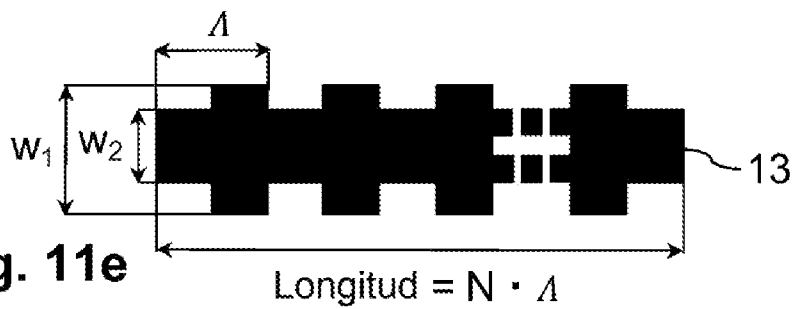


Fig. 11e

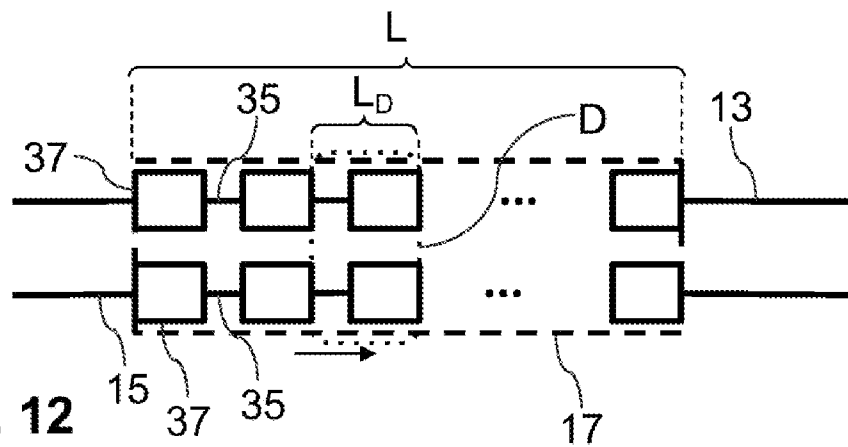


Fig. 12

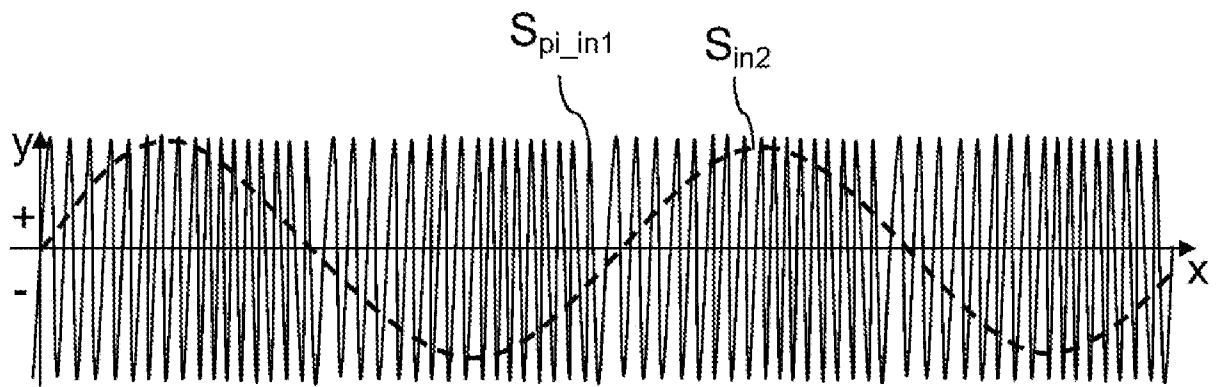


Fig. 13

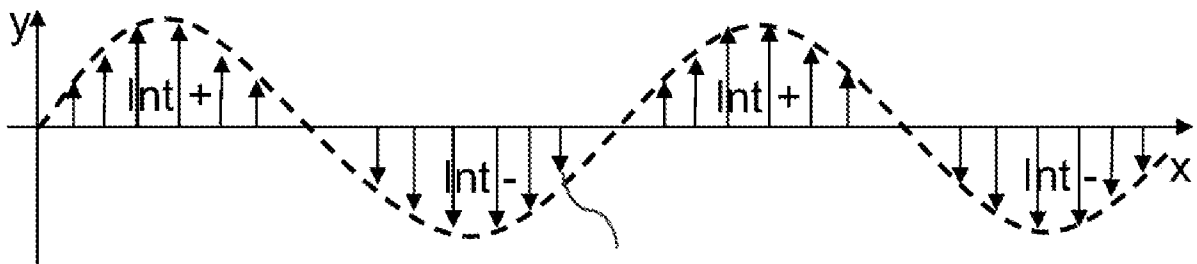


Fig. 14

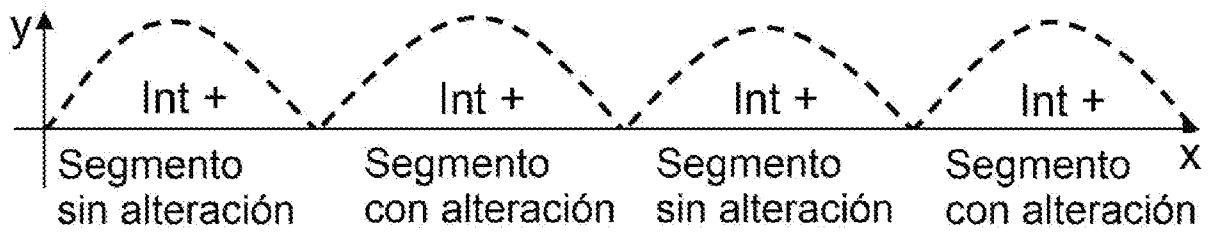


Fig. 15

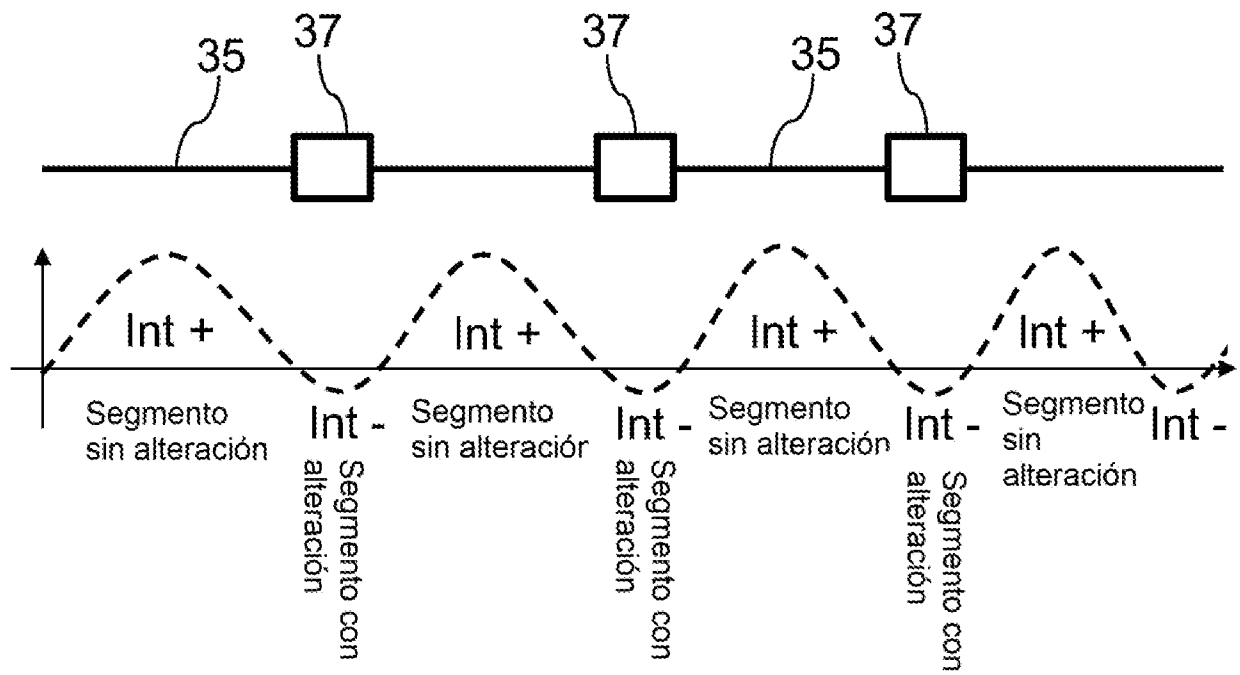


Fig. 16

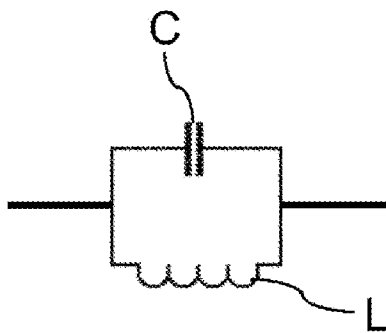


Fig. 17

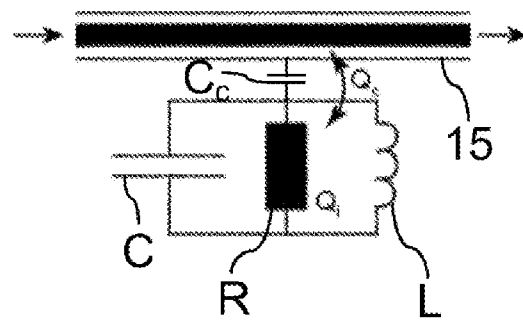


Fig. 18

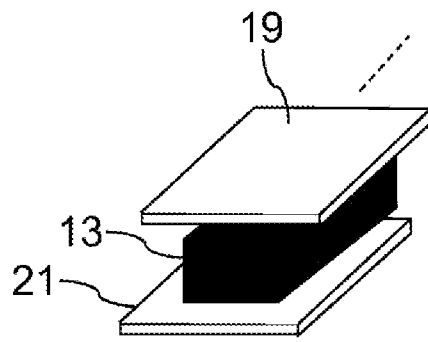


Fig. 19

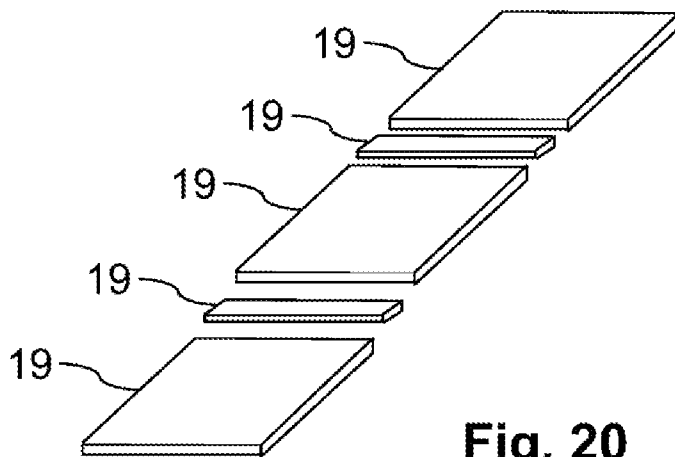


Fig. 20

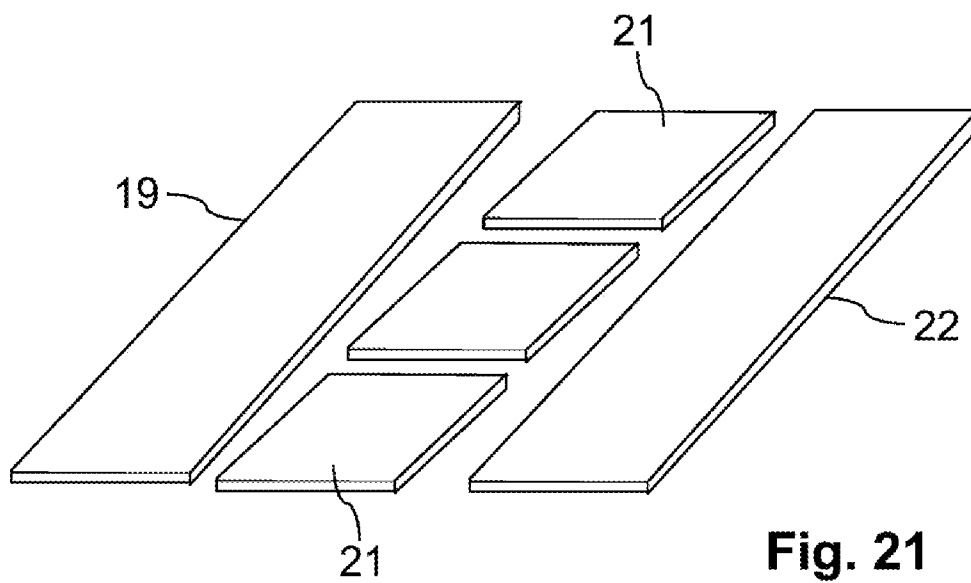


Fig. 21