

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 731 556**

51 Int. Cl.:

G10K 11/04 (2006.01)

G10K 11/172 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.03.2014 PCT/GB2014/050684**

87 Fecha y número de publicación internacional: **18.09.2014 WO14140538**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.03.2014 E 14712707 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.05.2019 EP 2973538**

54 Título: **Un metamaterial**

30 Prioridad:

13.03.2013 GB 201304500

13.03.2013 EP 13275054

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

15.11.2019

73 Titular/es:

BAE SYSTEMS PLC (100.0%)

**6 Carlton Gardens
London SW1Y 5AD, GB**

72 Inventor/es:

**DALEY, STEPHEN y
REYNOLDS, MATTHEW, JOHN**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 731 556 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

Un metamaterial

5 Campo de la invención

Esta invención se refiere al campo de los metamateriales. En particular, la invención se refiere a un material artificial diseñado para tener una baja transmisividad de las ondas de sonido en un rango de frecuencias acústicas.

10 Antecedentes de la invención

Los metamateriales son materiales artificiales que se construyen para tener propiedades particulares, típicamente propiedades que no se encuentran fácilmente en materiales naturales. Un ejemplo de metamateriales son los materiales ópticos microestructurados contruidos para tener una transmisividad de la luz muy baja en un rango de frecuencias electromagnéticas. Esas frecuencias se conocen normalmente como un intervalo de banda fotónico, en analogía con los intervalos de banda observados en el comportamiento de los electrones en los semiconductores. Al menos algunos intervalos de banda fotónicos se pueden entender en términos de dispersión de Bragg de fotones en un material microestructurado periódico. El término "intervalo de banda" se usa a menudo para describir una baja transmisividad resultante de la estructura de los metamateriales, incluso cuando no se observa un intervalo de banda "completo" (como se define en la teoría de Bloch-Floquet).

Posteriormente al desarrollo de metamateriales que exhiben dichos intervalos de banda fotónicos (completos o parciales), se hicieron intentos para desarrollar metamateriales que exhibieran intervalos de banda fonónicos, es decir, regiones en el espectro de frecuencias en las que la transmisividad de los cuantos de sonido o fonones se reduce considerablemente, lo que lleva a niveles muy altos de atenuación. Además, a diferencia de los materiales periódicos tradicionales que se han empleado a altas frecuencias, los metamateriales acústicos pueden incluir elementos resonantes que permiten que se formen brechas de banda dentro del límite de longitud de onda larga. Es en las frecuencias bajas donde es más difícil diseñar soluciones de aislamiento pasivo satisfactorias, y, por lo tanto, los metamateriales pueden proporcionar un camino útil para el aislamiento de alta frecuencia y alto rendimiento.

El comportamiento de los metamateriales fotónicos y fonónicos localmente resonantes se puede entender en términos de su llamada "zurdera". En un material óptico que tiene simultáneamente una permeabilidad electromagnética negativa y una permisividad electromagnética negativa en algunas frecuencias (cuando se dice que el material está en su región doble negativa o DNG), el índice de refracción tiene un signo negativo, por lo que se produce una refracción negativa. La ley de refracción de Snell todavía se aplica, pero, como el índice de refracción es negativo, la trayectoria de la onda reflejada se encuentra en el lado opuesto de la normal a la superficie reflectante que la que se esperaría en un medio de transmisión con un índice de refracción positivo, y los vectores de velocidad de grupo y de fase son antiparalelos.

En los metamateriales acústicos, los análogos de permeabilidad y permisividad son la densidad y el módulo de volumen, respectivamente. Por lo tanto, la refracción negativa ocurre cuando la densidad y el módulo de volumen de los metamateriales son simultáneamente negativos. Como se discutió anteriormente, y al igual que con los metamateriales ópticos, aparecen brechas en las características de dispersión de los metamateriales, a altas frecuencias debido a los efectos de dispersión de Bragg relacionados con las propiedades periódicas del metamaterial.

En los metamateriales donde se producen resonancias de baja frecuencia, las brechas también pueden ocurrir a frecuencias de resonancia más bajas, típicamente en frecuencias de alrededor de dos órdenes de magnitud más bajas que los intervalos de banda de Bragg. Esto conduce a altos niveles de atenuación en las características de transmisión del material en estas frecuencias. Esta baja transmisividad del sonido tiene el potencial de producir un comportamiento acústico novedoso más allá de lo que se ve en los medios naturales, con aplicaciones potenciales que incluyen el encubrimiento acústico, el bloqueo de la transmisión y las lentes acústicas de longitud de onda inferior.

Un ejemplo (Figura 1(a)) de un metamaterial acústico que tiene una región de frecuencia con un módulo de volumen negativo se forma a partir de una matriz de resonadores 10 de Helmholtz conectados a un medio 20 de transmisión de fluidos unidimensional.

Se ha demostrado que otras disposiciones poseen un módulo de elasticidad o densidad efectiva negativa. En la banda negativa única (SNG), esos sistemas tienen un índice de refracción complejo que actúa para bloquear parcialmente la propagación de una onda de presión a través del medio. Pope, S.A. and Daley, S. (2010) "Viscoelastic locally resonant double negative metamaterials with controllable effective density and elasticity". *Physics Letters A*, 374, 4250-4255 modelan (Figura 1b) el resonador 10 de Helmholtz y la región 20 de transmisión del fluido como una secuencia de pares de celdas idénticas, cada par formado por un elemento resonador 10 de Helmholtz y un elemento 20' de transmisión del fluido. Cada elemento resonador 10 de Helmholtz se modela como un m_r de masa con un desplazamiento x_{rr} conectado a un punto 30 de referencia estacionario a través de un elemento de rigidez c_h , k_h y al medio 20 de transmisión a través de un elemento de amortiguación c_r , k_r . El propio medio 20' de transmisión se modela como una masa m , a la que está conectado el elemento de amortiguamiento c_r , k_r , conectado a las masas adyacentes m mediante elementos de rigidez k , c . Los parámetros materiales efectivos se derivan utilizando las leyes clásicas del

movimiento en forma del principio de D'Alembert, asumiendo las propiedades del material viscoelástico lineal. Se muestra que una cascada de resonadores Helmholtz modelados de esa manera, es decir, que son dinámicamente equivalentes a una masa con dos conexiones elásticas separadas, una al medio de transmisión y la otra a una referencia estacionaria, constituye un medio capaz de proporcionar una densidad efectiva negativa pero no un módulo de volumen efectivo negativo.

Huaijun, C. et al., (2012), "Double-negative acoustic metamaterial based on hollow steel tube meta-atom" (<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1209/1209.6188.pdf>), revela otra realización de un metamaterial para la atenuación de la transmisión acústica, consistiendo el metamaterial en una serie de capas de resonadores de tubos de acero huecos alternados con capas de una matriz de esponja, donde las capas de tubos de acero huecos se adhieren en la superficie de las capas vecinas de esponja. Lee, S. H., (2009), "Acoustic metamaterial with negative density", PHYSICS LETTERS A, vol. 373, No. 48, 4464-4469, describe otro metamaterial que consiste en una serie de secciones de tubería cilíndricas, que forman estructuras de transmisión de guía de onda, que se insertan, en serie, entre resonadores Helmholtz en forma de copa.

Pope and Daley también muestran que una matriz de resonadores Helmholtz puede modelarse (Figura 1(c)) mediante una matriz de masas m_r controladas localmente con una sola conexión elástica a través del elemento de amortiguamiento c_r , k_r , al medio 20 de transmisión. Aunque el arreglo de masas m_r con una sola conexión elástica al medio 20 de transmisión nuevamente solo proporciona un sistema con una masa efectiva negativa, a no un módulo de volumen negativo, un esquema de control activo local f_{cn} aplicado a cada una de las masas m_r puede emular conexiones elásticas adicionales a la estructura de soporte. Un arreglo de masas con un esquema de control local adecuado puede proporcionar tanto la rigidez efectiva como la masa necesaria para la refracción negativa. Los parámetros de control de retroalimentación ajustables determinan las características de la región de doble negatividad. De este modo, al extender el sistema de control para tener en cuenta el movimiento de la red de transmisión, se puede realizar un medio homogéneo efectivo con la posibilidad de una densidad y elasticidad efectivas negativas.

Sin embargo, el control activo de las masas m_r es menos deseable que el control pasivo, ya que es más complejo. Además, sería deseable extender el rango de frecuencias en donde se puede lograr un índice de refracción negativo. Además, el sistema de la técnica anterior de Pope and Daley es una propuesta teórica, y sería deseable proporcionar una estructura del mundo real que muestre una transmisividad acústica significativamente reducida, en relación con los materiales comparables de la técnica anterior.

Resumen de la invención

Un primer aspecto de la invención proporciona un metamaterial para atenuar la transmisión acústica, según las reivindicaciones 1-14, comprendiendo el metamaterial una pluralidad de capas, comprendiendo cada capa:

(a) una estructura de transmisión, y

(b) un resonador, acoplado por un acoplamiento a la estructura de transmisión,

en donde la estructura de transmisión en una capa está acoplada por un acoplamiento a las estructuras de transmisión de la(s) capa(s) vecina(s) a dicha capa; en donde el resonador en una capa está acoplado por un acoplamiento a la estructura de transmisión de la(s) capa(s) vecina(s) a dicha capa.

De este modo, las estructuras de transmisión de capas sucesivas se acoplan entre sí para formar una estructura de transmisión continua que se extiende a través de la pluralidad de capas. Los resonadores no interrumpen la estructura de transmisión continua. Las estructuras de transmisión de las capas sucesivas pueden considerarse acopladas en serie entre sí y los resonadores de las capas sucesivas pueden considerarse acopladas en paralelo con las estructuras de transmisión de las capas sucesivas.

El experto en la materia entenderá que la transmisión acústica es una vibración de la estructura de transmisión.

Puede ser que los resonadores en todas las capas estén acoplados a las estructuras de transmisión de sus dos capas vecinas o, en el caso de capas en los extremos del metamaterial, a la estructura de transmisión de su capa vecina.

Puede ser que las estructuras de transmisión en todas las capas estén acopladas a las estructuras de transmisión de sus dos capas vecinas o, en el caso de capas en los extremos del metamaterial, a la estructura de transmisión de su capa vecina.

Puede ser que, en una banda de frecuencias, la transmisión acústica se reduzca al menos en 3dB, al menos 5dB, al menos 10dB o incluso al menos 20dB por capa del metamaterial.

Puede ser que, en una banda de frecuencias, haya un intervalo de banda en el espectro de transmisión acústica, en donde la transmisión acústica se reduce sustancialmente a cero.

Puede ser que haya al menos tres de dichas capas. Puede ser que haya más de tres de dichas capas.

Puede ser que la estructura de transmisión comprenda un disco o un anillo. Puede ser que los discos o anillos de las capas sean coaxiales entre sí. Puede ser que los discos o anillos sean de metal.

5 Puede ser que el resonador sea un cilindro, por ejemplo, un cilindro de sección transversal circular. Puede ser que los cilindros de las capas sean coaxiales entre sí. En el caso en donde la estructura de transmisión comprenda un disco o un anillo, puede ser que los cilindros sean coaxiales con los discos o anillos.

10 Puede ser que el resonador en una capa esté acoplado a la estructura de transmisión de la capa en la que está comprendido y de la(s) capa(s) vecina(s) a dicha capa que está suspendida de esas estructuras de transmisión, por ejemplo, por brazos, para ejemplo de resortes de hojas.

15 Puede ser que cualquiera de los acoplamientos mencionados anteriormente sea un acoplamiento viscoelástico. Puede ser que cualquiera de los acoplamientos mencionados anteriormente sea o incluya un material elastomérico, por ejemplo, caucho natural o neopreno. Puede ser que cualquiera de los acoplamientos mencionados anteriormente sea un resorte, por ejemplo, una bobina o resorte helicoidal, un resorte de hoja. Por ejemplo, puede ser que la conexión entre el resonador y la estructura de transmisión sea por un resorte de hoja. Puede ser que la conexión entre las estructuras de transmisión de las capas vecinas sea por medio de una bobina o resorte helicoidal. Puede ser que el acoplamiento sea por una pluralidad de acoplamientos, distribuidos uniformemente a través del resonador y/o la estructura de transmisión.

20 Puede ser que el metamaterial incluya al menos un elemento activo configurado para mejorar la atenuación de la transmisión acústica. Puede ser que el al menos un elemento activo esté comprendido en al menos uno de los resonadores. Puede ser que el elemento activo sea un actuador. Por ejemplo, el accionador puede proporcionarse en un hueco (por ejemplo, una ranura o depresión en forma de copa) en el resonador.

25 Puede ser que el resonador en una capa esté acoplado al resonador de una capa vecina, por ejemplo, a través de al menos un elemento activo. Puede ser que el resonador en una capa esté acoplado a ambos resonadores en ambas capas vecinas. Puede ser que los resonadores en todas las capas estén acoplados a los resonadores de sus dos capas vecinas o, en el caso de capas en los extremos del metamaterial, al resonador de su capa vecina. Puede ser que el elemento activo sea configurado para mejorar la atenuación de la transmisión acústica mediante el control de las fuerzas reactivas entre los elementos del resonador.

30 Puede ser que el resonador de cada capa comprenda un elemento activo configurado para mejorar la atenuación de la transmisión acústica. Puede ser que el elemento activo esté configurado para aplicar una fuerza puntual al resonador.

35 Puede ser que el elemento activo esté configurado para mejorar la atenuación de la transmisión acústica de acuerdo con el algoritmo de optimización. Puede ser que el algoritmo de optimización minimice el movimiento de un elemento de una capa en un primer extremo de las capas en respuesta al movimiento de un elemento de una capa en un segundo extremo opuesto de las capas. El algoritmo de optimización puede ser un algoritmo de avance óptimo, por ejemplo, un algoritmo x Filtrado Media de Mínimos Cuadrados (FxLMS). El algoritmo de optimización puede ser un algoritmo de retroalimentación óptimo, por ejemplo, un algoritmo H-infinito.

40 Puede ser que la pluralidad de capas sea una estructura periódica. Puede ser que cada capa sea una celda unitaria de la estructura periódica.

45 Un segundo aspecto de la invención proporciona un método para fabricar un metamaterial, como se reivindica en la reivindicación 15, comprendiendo el método fabricar el metamaterial del primer aspecto de la invención mediante una técnica de impresión tridimensional, por ejemplo, una técnica de capa aditiva.

50 Por supuesto, se apreciará que las características descritas en relación con un aspecto de la presente invención pueden incorporarse en otros aspectos de la presente invención. Por ejemplo, el método de la invención puede incorporar cualquiera de las características descritas con referencia al metamaterial de la invención.

Breve descripción de los dibujos

55 Las realizaciones de la invención se describirán ahora, solo a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos, de los cuales:

60 La Figura 1 es una representación esquemática de metamateriales de la técnica anterior, (a) una serie de resonadores Helmholtz conectados a un flujo de fluido unidimensional, (b) un modelo de parámetros agrupados de una serie de resonadores Helmholtz conectados a un material de transmisión y (c) un modelo de parámetros concentrados de una serie de masas periódicas controladas activamente con una única conexión elástica, que es un material de transmisión;

La figura 2 es una representación esquemática de un modelo de parámetros agrupados de un ejemplo de un metamaterial de acuerdo con una realización de la invención;

5 La Figura 3 es, para un metamaterial de acuerdo con una realización de ejemplo de la invención que tiene cuatro capas acopladas, resultados de modelado para (a) la respuesta de transmisión pasiva (transmisión en dB versus frecuencia en Hz - la región negativa doble se muestra sombreada) y (b) la relación de dispersión (kd frente a la frecuencia en Hz) del material;

10 La figura 4 es (a) una representación en 3D CAD de la construcción del metamaterial de la figura 3, y (b) una fotografía del metamaterial realizado experimentalmente; y

15 La figura 5 es, para el metamaterial de las Figuras 3 y 4, (a) el espectro de transmisión ((i) la función de transferencia entre la las placas inferior y de transmisión, en función de la ganancia G, en función de la frecuencia en Hz, y (ii) la coherencia entre las placas inferior y de transmisión en función de la frecuencia en Hz) a niveles variables de perturbación de entrada), (b-c) historiales de tiempo del metamaterial activo cuando el control se aplica después de aproximadamente 1 segundo, donde (b) muestra la aceleración de la placa de transmisión superior (superior) y la señal de control (inferior) para una perturbación tonal de 146Hz, y (c) la aceleración de la placa de transmisión superior para una perturbación de banda ancha limitada a la banda; (d) una comparación de la reducción en la transmisión lograda para una entrada de banda ancha con la reducción máxima equivalente alcanzada a una entrada tonal en cada frecuencia.

Descripción detallada

25 Una realización de ejemplo de la invención se fabricó en forma de un metamaterial viscoelástico 1-dimensional activo que consiste en una cadena de masas de transmisión conectadas entre sí y a las masas de resonador a través de elementos de resorte. Este metamaterial periódico localmente resonante se ha desarrollado como una prueba de concepto para un aislador de vibraciones que proporciona una buena atenuación a bajas frecuencias. El material de ejemplo logra el comportamiento DNG a través del acoplamiento pasivo de resonadores a dos masas de transmisión; en contraste, los materiales de la técnica anterior tienen una masa de resonador por masa de transmisión y requieren un control activo para lograr la doble negatividad.

35 El intervalo de banda que se produce de forma pasiva se mejora utilizando una arquitectura de control activa. Dado que los diseños localmente resonantes producen materiales con propiedades dispersivas, el comportamiento beneficioso de DNG y el intervalo de banda de baja frecuencia, aunque se logran de forma pasiva, en este ejemplo se limita a las bandas de frecuencia fija y estrecha. Por lo tanto, se empleó el control activo para ampliar la región en la que se produce la atenuación. El control activo utilizado en este ejemplo es un algoritmo X Filtrado Media de Mínimos Cuadrados (FxLMS). El uso del sistema de control activo junto con el comportamiento pasivo natural del metamaterial permite altos niveles de aislamiento en un amplio rango de frecuencias.

40 Para muchas aplicaciones, sería deseable crear una mayor densidad de elementos resonantes. A medida que aumentan las densidades, las técnicas de fabricación convencionales se hacen cada vez más problemáticas. Por lo tanto, el material presentado aquí fue diseñado y producido utilizando técnicas de fabricación de capas aditivas.

45 En la Figura 2 se muestra un modelo de parámetros concentrados del metamaterial de ejemplo. El metamaterial comprende un medio 20' de transmisión y un resonador 100. Como antes, el medio 20' de transmisión se modela como una masa (aquí etiquetada como $m_{t,n}$ para el n -ésimo elemento resonador), conectado a masas adyacentes $m_{t,n-1}$, $m_{t,n+1}$ por elementos de rigidez (aquí etiquetados k_t , c_t). De nuevo, como en el material de la técnica anterior de la Figura 1(b) y (c), cada elemento resonador 100 se modela como una masa (aquí etiquetada $m_{r,n}$) conectada al medio 20' de transmisión a través de un elemento amortiguador (aquí etiquetado c_r , k_r). Sin embargo, en el metamaterial de ejemplo de la Figura 2, hay conexiones viscoelásticas adicionales (aquí también marcadas como c_r , k_r), que se agregan a los elementos resonadores 100', de modo que cada elemento resonador está ahora conectado a dos masas de transmisión adyacentes $m_{t,n}$. Esto acopla de manera pasiva los resonadores en cada capa del metamaterial a los elementos de masa de transmisión en la capa adyacente y proporciona una región de doble negatividad.

55 Para proporcionar un control activo, en este ejemplo se aplican fuerzas reactivas entre las masas de resonador $m_{r,n}$, indicadas por $f_{c,n}$. El uso de actuadores reactivos simplifica el proceso de diseño del algoritmo de control a expensas de la libertad sobre la naturaleza de las fuerzas de control que se pueden aplicar.

60 De este modo, el metamaterial de ejemplo se modela como una cadena simple equivalente de masas efectivas conectadas por conexiones viscoelásticas. La ecuación de movimiento para el material se puede escribir como

$$-\omega^2 M_e x_n + (i\omega C_e + K_e)(2x_n - x_{n+1} - x_{n-1}) = f_n \quad (1)$$

donde M_e es la masa efectiva, $(i\omega C_e + K_e)$ es la rigidez y la amortiguación, ω es la frecuencia de oscilación, x_n es el desplazamiento de la masa nth en la cadena y f_n es la fuerza sobre esa masa. Al formular y reorganizar la ecuación de movimiento para el modelo de material explícito de la Figura 2, podemos escribir:

$$-\omega^2 \left(m + \frac{2m_r(k_r + j\omega c_r)}{-\omega^2 m_r + 2(k_r + j\omega c_r)} \right) x_n + \left(k + j\omega c + \frac{(k_r + j\omega c_r)^2}{-\omega^2 m_r + 2(k_r + j\omega c_r)} \right) (2x_n - x_{n+1} - x_{n-1}) = f_n \quad (2)$$

donde m , k y c se usan para denotar las propiedades del medio de transmisión y el subíndice r se usa para denotar las propiedades de los resonadores. Al comparar (1) y (2), vemos que la masa efectiva, M_e , y la rigidez y la amortiguación $K_e + j\omega C_e$ están dadas por

$$M_e = m + \frac{2m_r(k_r + j\omega c_r)}{-\omega^2 m_r + 2(k_r + j\omega c_r)} \quad (3)$$

$$K_e + j\omega C_e = k + j\omega c + \frac{(k_r + j\omega c_r)^2}{-\omega^2 m_r + 2(k_r + j\omega c_r)} \quad (4)$$

Esas expresiones son complejas: $\text{Im}(M_e)$ es un término disipativo adicional introducido por la presencia de amortiguamiento dentro de los elementos 100 resonadores, mientras que $\text{Re}(M_e)$ es la masa inercial efectiva del sistema y la cantidad de interés. Del mismo modo, la parte real de $K_e + j\omega C_e$ es la rigidez efectiva del sistema, y la parte imaginaria es la amortiguación efectiva disipativa. La rigidez efectiva y la masa resuenan a la misma frecuencia entre sí, lo que significa que las regiones de los parámetros materiales efectivos negativos se intersectarán y, por lo tanto, el material será doblemente negativo cuando ambos sean negativos.

Una respuesta de transmisión de material pasiva típica (el movimiento de la última masa de transmisión relacionada con la primera), incluido el signo de cada parámetro de material, se muestra en la Figura 3(a) para el modelo de material.

La doble región negativa (resaltada en gris en la Figura 3(a)) es coincidente con la región de atenuación conocida como la brecha de la banda. Estudios anteriores han sugerido que la brecha de banda se produce cuando el metamaterial se convierte en único negativo, lo que hace que el vector de onda, k , se vuelva imaginario, lo que indica una solución evanescente en lugar de viajar a la ecuación de onda, y que cuando el material se convierte en doble negativo, una banda de paso se produce en lo que ahora es un material 'zurdo'. El experto en la materia con respecto a la técnica anterior, por lo tanto, esperaría que la transmisividad aumentara en la región doble negativa, en comparación con su valor en una región negativa única adyacente. Sin embargo, esa explicación descuida las pérdidas disipativas dentro del material. La relación de dispersión de Bloch de un metamaterial periódico de este tipo, de longitud infinita y que tiene el periodo d es

$$\cos kd = 1 - \frac{\omega^2 M_e}{K_e + j\omega C_e} \quad (5)$$

La solución será compleja para un material DNG si los parámetros efectivos del material son complejos en sí mismos, lo que da como resultado una onda (real) en movimiento con una envolvente de atenuación (imaginaria). Cuando las relaciones que gobiernan los parámetros materiales efectivos resuenan, la magnitud de los términos imaginarios se vuelve muy grande, lo que lleva a altos niveles de atenuación. Si bien no es un intervalo de banda 'completo', como lo define la teoría de Bloch-Floquet, los niveles de atenuación son tan altos que se comportan de manera efectiva como un intervalo de banda. La resolución de la ecuación 5 para kd da las características de dispersión del material, graficadas en la Figura 3(b). Está claro que la región donde la magnitud de la parte imaginaria del número de onda se hace grande coincide con el intervalo de banda de la respuesta del material. (Nótese que debido al dominio restringido de la función \cos^{-1} , la parte real calculada de la característica de dispersión se limita a $0 \leq kd \leq \pi$, por lo tanto, el truncamiento en la Figura 3(b); en realidad, el número de onda no está ligado de esta manera).

El metamaterial consiste en una serie de capas periódicas, por lo tanto, un método conveniente para modelar la propagación de vibraciones a través del material es considerar el material como una serie de redes con puertos lineales de 4 polos que forman una línea de transmisión. Aquí, se formula una matriz de transferencia para describir la transformación de un vector de estado a otro a través de la cadena de masas (por ejemplo, $q_n \rightarrow q_{n+1} \dots \rightarrow q_N$). Para formular la matriz de transferencia se consideran los vectores de estado que representan la fuerza (f) y el desplazamiento (q) de cada celda de la cadena, donde en este caso estos vectores de estado son valores escalares y cada celda consta de un conjunto único de elementos equivalentes de masa-resorte-amortiguador. Ahora, la relación entre la fuerza y el desplazamiento a través de un material de múltiples capas se puede considerar en términos de matrices de transferencia T , de manera que

$$\begin{Bmatrix} q_N \\ f_N \end{Bmatrix} = \prod_0^N T_n \begin{Bmatrix} q_0 \\ f_0 \end{Bmatrix} = \tau \begin{Bmatrix} q_0 \\ f_0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$$T_n = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\omega^2 M_e}{K_e + j\omega C_e} & -\frac{1}{K_e + j\omega C_e} \\ \omega^2 M_e & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Nótese que, si las capas múltiples son idénticas, como en el caso de un metamaterial periódico, el producto de las matrices de transferencia se reduce a $\tau = T^N$. También nótese que $|T| = 1$, que es una propiedad de los sistemas recíprocos, y más específicamente una restricción de las redes pasivas, lineales, de cuatro polos. Al aplicar la condición inicial $f_N = 0$, la función de transferencia de transmisión, H , del material de la primera a la última masa viene dada por la Ecuación 8, donde el subíndice (p, q) denota las columnas p th y q th de T^N .

$$H_T = \frac{x_N}{x_0} = \left(T_{1,1}^N - \frac{T_{1,2}^N T_{2,1}^N}{T_{2,2}^N} \right) \quad (8)$$

Se construyó una realización experimental de 4 capas del metamaterial. En la Figura 4(a) se muestra una representación en CAD del diseño de la celda, junto con una foto de la configuración experimental en la Figura 4(b).

El metamaterial 400 está hecho de una pila de celdas 410. Cada celda 410 tiene la forma de un par de anillos 420 de titanio idénticos, dispuestos coaxialmente entre sí. Los anillos 420 están conectados directamente entre sí mediante cuatro resortes 430 helicoidales, espaciados uniformemente alrededor del anillo 420. Cada anillo 420 también está conectado a los extremos exteriores de los cuatro resortes 440 de hojas. Los extremos internos de los cuatro resortes 440 de hojas están conectados a una masa 450 cilíndrica. Por lo tanto, la masa 450 cilíndrica está suspendida por ocho resortes 440 de hojas del par de anillos 420, con cuatro unidos a una primera superficie de extremo del cilindro y cuatro unidos a la superficie de extremo opuesta. La celda 410 se produjo utilizando una técnica de fusión por láser selectiva de capa aditiva (SLM), por lo que cada celda 410 es una estructura de titanio discreta. Los anillos 420 de las celdas 410 separadas se atornillaron para producir un metamaterial 400 periódico continuo. El metamaterial que se muestra en la Figura 4(b) consta de tres de las celdas 410.

Considerados en términos del modelo de la Figura 2, el anillo 420 de titanio y los resortes 430 helicoidales forman el oscilador de masa y amortiguado del medio 20' de transmisión y la masa 450 cilíndrica y los resortes 440 de hoja forman los osciladores de masa y amortiguados del resonador 100. Nótese que cada masa 450 cilíndrica está conectada a los dos anillos 420 a los que está adyacente, es decir, cada masa resonadora está conectada a dos masas de transmisión a través de osciladores amortiguados, como en la Figura 2.

La masa cilíndrica 450 del resonador incluye un hueco 460 en donde se aloja un actuador reactivo a bobina de voz (no mostrado), de modo que se pueden aplicar fuerzas de control (de nuevo de acuerdo con la Figura 2).

Para medir la respuesta del metamaterial 400 completo, la estructura se atornilló a una placa de acero que luego se excitó utilizando un actuador de inercia. El movimiento del anillo 420 superior e inferior se midió luego utilizando acelerómetros 470, y se calculó la función de transferencia. Se utilizó un sistema de creación rápida de prototipos dSpace® para proporcionar la señal de excitación y para registrar las señales del acelerómetro.

El control activo también se aplicó utilizando el sistema dSpace®, que procesa las señales del acelerómetro en tiempo real utilizando un algoritmo apropiado para aplicar las fuerzas de control a los actuadores reactivos. Para conveniencia experimental, se usó un algoritmo de un solo canal X Filtrado Media de Mínimos Cuadrados (FxLMS), ya que es un algoritmo sólido y bien establecido que podría implementarse simplemente para demostrar la eficacia del enfoque

activo. El algoritmo se empleó para minimizar la aceleración del anillo 420 superior utilizando la aceleración del anillo 420 inferior como una señal de referencia. Aunque el material activo contenía dos actuadores, en este caso solo se empleó uno.

5 La Figura 5(a) presenta (i) la respuesta pasiva del material para diferentes niveles de excitación, así como (ii) la coherencia entre las señales medidas en el anillo 420 inferior y superior. El material fue diseñado para tener una respuesta pasiva como se muestra en la Figura 3(a), e inicialmente se creyó que había evidencia de una brecha de banda a aproximadamente 80Hz como se esperaba. Sin embargo, se puede ver en la Figura 5(a) que la atenuación en esa región disminuye a medida que aumenta el nivel de excitación; el comportamiento, por lo tanto, parece ser la consecuencia de una no linealidad. Se piensa que esto se debe a la presencia de una fricción estática dentro de los ensamblajes del actuador debido a la desalineación, así como a un efecto significativo de aire-resorte. Sin embargo, se puede ver en la respuesta que existen brechas de banda estables en frecuencias más altas: hay una brecha estrecha y profunda a 207Hz, y una brecha más ancha pero poco profunda de alrededor de 250Hz. Quedó claro durante el proceso de fabricación que la técnica de fabricación de capa aditiva empleada se estaba estirando hasta sus límites y, a la luz de eso, la discrepancia en las frecuencias de banda prohibida y alcanzadas tal vez no sea sorprendente. De particular importancia es la especificación de los resortes 440 de hojas, cuya rigidez es muy sensible a su espesor; dificultades de fabricación significaron que los resortes 440 de hojas producidos eran de grosor variable. Además de estas inconsistencias, varios de los resortes 440 estaban deformados y no estaban paralelos al anillo 420. Es probable que esto haya tenido un gran efecto en la rigidez de los resonadores, lo que significa que no están resonando a la frecuencia diseñada ni necesariamente a la misma frecuencia entre sí. Si bien la respuesta resultante de esta realización física particular del material no es deseable en una aplicación de aislamiento pasivo, el material indica el potencial de la metodología y proporciona una prueba útil del concepto de aplicación de control activo para mejorar las propiedades de atenuación de los metamateriales viscoelásticos.

25 El algoritmo FXLMS se aplicó para controlar la aceleración del anillo 420 superior inicialmente para perturbaciones tonales, y luego para una perturbación de ruido blanco que estaba limitada por la banda de 100Hz a 300Hz. Las figuras 5(b) y 5(c) muestran los historiales de tiempo para el anillo 420 superior después de que se haya aplicado el control para las perturbaciones de banda ancha y tonal, respectivamente, lo que demuestra que el controlador puede lograr una reducción considerable en la transmisión en relación con el rendimiento pasivo. El control tonal se logra utilizando dos filtros de 1 coeficiente, controlando la amplitud de una versión en fase y una en cuadratura de la señal de referencia para cancelar la perturbación. Para controlar una perturbación de banda ancha, el algoritmo FXLMS configura un filtro de control único de 2048 coeficientes.

35 La Figura 5(d) muestra el espectro de transmisión del material pasivo junto con el rendimiento alcanzado por el material activo cuando está sujeto a la perturbación de banda ancha limitada a la banda. En el gráfico también se representan las reducciones equivalentes logradas por el controlador tonal en cada frecuencia distinta. El rendimiento del controlador de banda ancha está limitado por la longitud del filtro de control, y los resultados tonales pueden considerarse una guía del rendimiento máximo que se puede lograr con esta configuración, ya sea utilizando un filtro más largo o utilizando un algoritmo de control de banda ancha más refinado. Los resultados de banda ancha demuestran que a lo largo del intervalo de frecuencia donde está presente la excitación hay una mejora significativa sobre el rendimiento de aislamiento pasivo. La brecha de banda que se produce de forma natural se ha ampliado significativamente y los niveles de atenuación máxima se han mejorado significativamente. Las resonancias perjudiciales fuera de banda también se han suprimido, especialmente a 146Hz.

45 Los resultados tonales muestran que se puede lograr un rendimiento de aislamiento significativo en un amplio rango de frecuencia, en algunos casos hasta 40 dB. Es importante el hecho de que los mayores niveles de atenuación se logran donde ocurren las brechas naturales de la banda. Esto respalda el argumento para usar materiales periódicos activos en aplicaciones de aislamiento de vibración en montajes de aislamiento activo más tradicionales. Un proceso de diseño unificado que coincida con las mejores características de la funcionalidad tanto activa como pasiva puede proporcionar niveles impresionantes de atenuación en anchos de banda ancha. A pesar del hecho de que el metamaterial experimental no coincidió con la especificación de diseño original, los resultados demuestran una prueba de concepto de que la arquitectura activa se puede usar para mejorar el rendimiento pasivo de los metamateriales, y en particular el comportamiento de banda estrecha inherente en los diseños periódicos localmente resonantes.

55 En resumen, como ejemplo de realización de la invención, se diseñó un metamaterial viscoelástico unidimensional que mostró un comportamiento negativo doble pasivo. Se incorporó una arquitectura de control activo en el diseño para facilitar la mejora del nivel y el ancho de banda de la atenuación asociada con la brecha de banda resonante. Con el propósito de producir dichos materiales en dimensiones más pequeñas, el metamaterial se diseñó para la fabricación utilizando técnicas de fabricación de capa aditiva. Se creó una demostración experimental del diseño del material a partir de titanio utilizando una técnica de capa de aditivo de fusión por láser selectiva. Las limitaciones de esta tecnología incipiente tuvieron un impacto perjudicial en la dinámica resultante del material, sin embargo, se demostró que aparecen brechas de bandas resonantes en la respuesta de transmisión pasiva. Además, se demostró que el nivel y el ancho de banda de atenuación de estas brechas de banda pasiva se pueden mejorar mediante el uso de la arquitectura activa.

65

Si bien la presente invención se ha descrito e ilustrado con referencia a realizaciones particulares, los expertos en la técnica apreciarán que la invención se presta a muchas variaciones diferentes que no se ilustran específicamente en este documento, definiéndose el alcance de la invención por reivindicaciones anexas.

- 5 El lector apreciará que los enteros o características de la invención que se describen como preferibles, ventajosos, convenientes o similares son opcionales y no limitan el alcance de las reivindicaciones independientes. Además, debe entenderse que tales enteros o características opcionales, aunque son de posible beneficio en algunas realizaciones de la invención, pueden no ser deseables, y por lo tanto pueden estar ausentes, en otras realizaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un metamaterial (400) para atenuar la transmisión acústica, comprendiendo el metamaterial una pluralidad de capas (410), comprendiendo cada capa (410):
- 5 a) una estructura (420) de transmisión, y
- (b) un resonador (450), acoplado por un acoplamiento (440) a la estructura (420) de transmisión, en donde el resonador (450) en una capa (410) está acoplado por un acoplamiento (440) a la estructura (420) de transmisión de la capa(s) (410) vecina a dicha capa (410), y
- 10 caracterizado porque la estructura (420) de transmisión en una capa (410) está acoplada por un acoplamiento (430) a las estructuras (420) de transmisión de la(s) capa(s) (410) vecina a dicha capa (410).
- 15 2. Un metamaterial como se reivindica en la reivindicación 1, en el cual hay al menos tres de dichas capas (410).
3. Un metamaterial como se reivindica en la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el cual la estructura (420) de transmisión comprende un disco o un anillo (420).
- 20 4. Un metamaterial como se reivindica en la reivindicación 3, en el cual los discos o anillos (420) de las capas (410) son coaxiales entre sí.
5. Un metamaterial como se reivindica en cualquier reivindicación precedente, en el cual el resonador (450) es un cilindro (450).
- 25 6. Un metamaterial como se reivindica en la reivindicación 5, en el cual los cilindros (450) de las capas (410) son coaxiales entre sí.
7. Un metamaterial como se reivindica en la reivindicación 6, en el cual la estructura (420) de transmisión comprende un disco o un anillo (420) y los cilindros (450) son coaxiales con los discos o anillos (420).
- 30 8. Un metamaterial como se reivindica en cualquier reivindicación precedente, en el cual cualquiera de los acoplamientos son acoplamientos viscoelásticos (430,440).
- 35 9. Un metamaterial como se reivindica en cualquier reivindicación precedente, en el cual el metamaterial (400) incluye al menos un elemento activo configurado para mejorar la atenuación de la transmisión acústica.
10. Un metamaterial como se reivindica en la reivindicación 9, en el cual el al menos un elemento activo está comprendido en al menos uno de los resonadores (450).
- 40 11. Un metamaterial como se reivindica en la reivindicación 9 o la reivindicación 10, en el cual el elemento activo está configurado para mejorar la atenuación de la transmisión acústica mediante el control de las fuerzas reactivas entre los elementos (450) resonadores.
- 45 12. Un metamaterial como se reivindica en la reivindicación 9 o la reivindicación 10, en el cual el elemento activo está configurado para aplicar una fuerza puntual al resonador (450).
13. Un metamaterial como se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12, en el cual el elemento activo está configurado para mejorar la atenuación de la transmisión acústica según un algoritmo de optimización.
- 50 14. Un metamaterial como se reivindica en la reivindicación 13, en el cual el algoritmo de optimización minimiza el movimiento de un elemento de una capa (410) en un primer extremo de las capas (410) en respuesta al movimiento de un elemento de una capa (410) en un segundo extremo opuesto de las capas (410).
- 55 15. Un método para fabricar un metamaterial (400), comprendiendo el método fabricar el metamaterial de cualquier reivindicación precedente mediante una técnica de impresión tridimensional.

Fig. 1

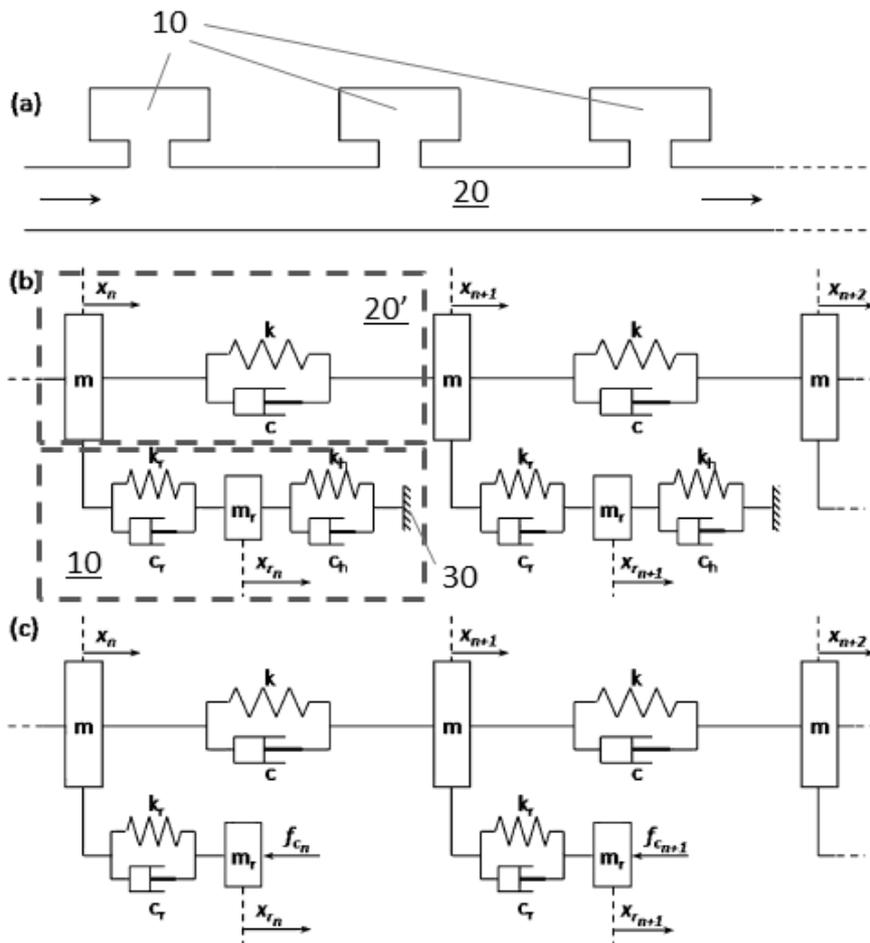


Fig. 2

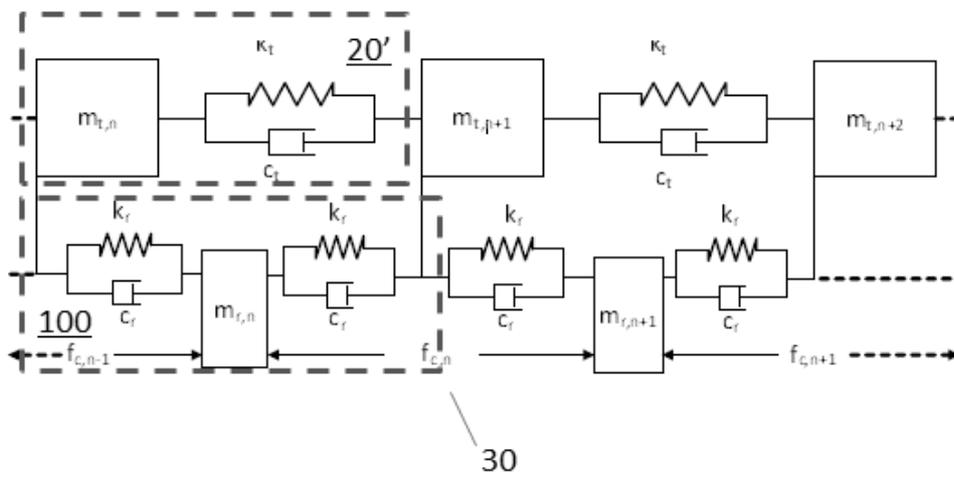


Fig. 3

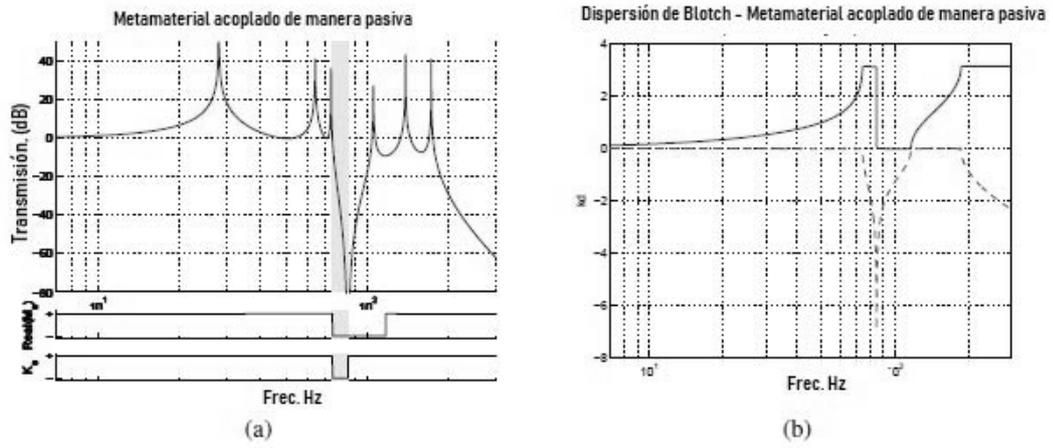


Fig. 4

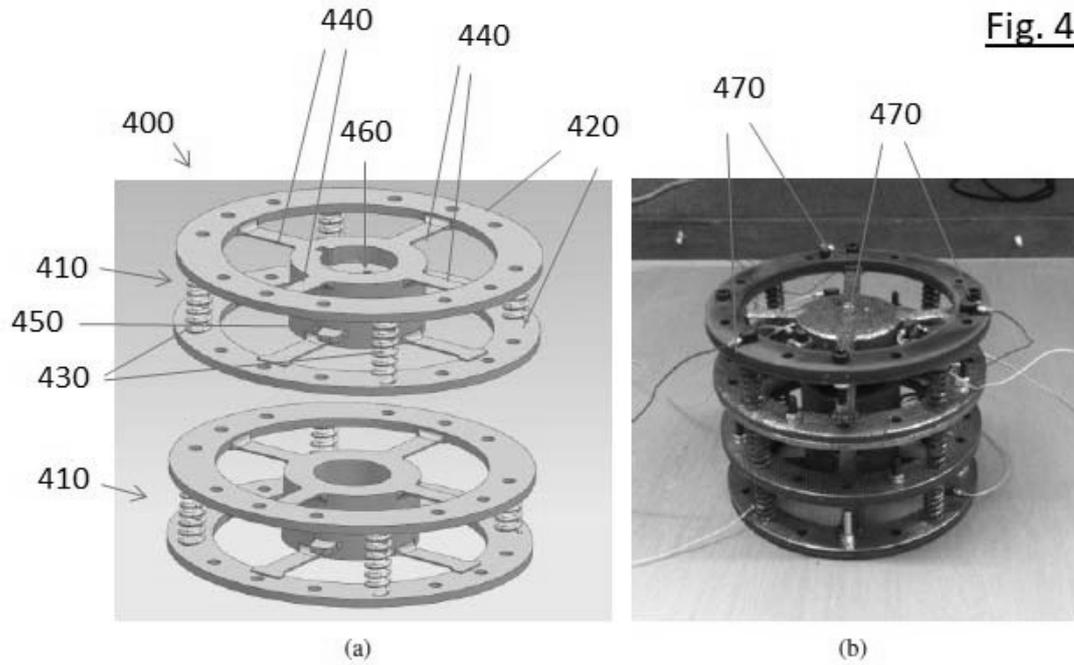


Fig. 5

