

(19)



Europäisches
Patentamt
European
Patent Office
Office européen
des brevets



(11)

EP 4 576 067 A1

(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:

25.06.2025 Bulletin 2025/26

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):

G10K 15/10^(2006.01)

(21) Numéro de dépôt: 24219157.5

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):

G10K 15/10

(22) Date de dépôt: 11.12.2024

(84) Etats contractants désignés:

AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC ME MK MT NL
NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR

Etats d'extension désignés:

BA

Etats de validation désignés:

GE KH MA MD TN

(30) Priorité: 22.12.2023 FR 2315181

(71) Demandeur: Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives

75015 Paris (FR)

(72) Inventeur: LIECHTI, Romain
38054 Grenoble Cedex 09 (FR)

(74) Mandataire: Brevalex
Tour Trinity
1 B Place de la Défense
92400 Courbevoie (FR)

(54) DISPOSITIF POUR RECRÉER UN EFFET DE RÉVERBÉRATION SONORE ET DOTÉ D'UN RESSORT MEMS

(57) Dispositif (100) micro-électromécanique de distorsion d'un signal électrique pour recréer un effet de réverbération sonore comportant :
- un connecteur d'entrée (1121) pour un signal électrique entrant ;
- un connecteur de sortie (1122) pour un signal électrique sortant ;
- un transducteur électromécanique d'entrée (123) couplé au connecteur d'entrée (1121) ;
- un transducteur électromécanique de sortie (124) couplé au connecteur de sortie (1122) ;
- une structure (121) de support ;
- ledit dispositif étant doté d'un ressort MEMS (122)

comportant une première extrémité (1222), une seconde extrémité (1223), la première extrémité et la deuxième extrémité étant reliées respectivement au transducteur électromécanique d'entrée (123) au moyen d'une articulation (125) au transducteur électromécanique de sortie (124) au moyen d'une autre articulation (125), le transducteur électromécanique d'entrée (123), le transducteur électromécanique de sortie (124) et les articulations (125) étant en partie encastrés sur la structure (121) de support, le transducteur électromécanique d'entrée (123) étant configuré pour mettre en mouvement l'articulation (125).

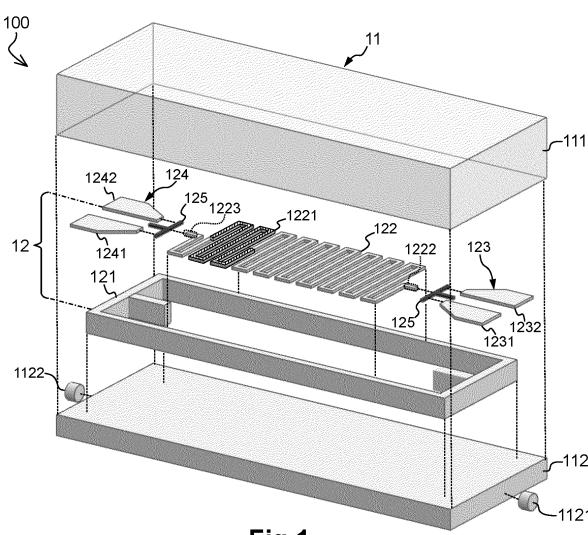


Fig.1

Description**Domaine technique**

- 5 [0001] La présente invention appartient au domaine technique des systèmes micro-électromécaniques (en anglais *Microelectromechanical systems, MEMS*). L'invention concerne plus particulièrement un ressort miniaturisé permettant de recréer l'effet de réverbération présent naturellement et notamment dans les pièces de grand volume.
- 10 [0002] L'invention trouve une application directe dans le domaine musical et permet de développer des effets sonores de manière analogique et compacte.

Etat de la technique

- 15 [0003] La recherche d'effets sonores, que ce soit en exploitant l'acoustique de lieux particuliers ou le rendu obtenu par l'utilisation de certains matériaux ou objets par exemple, constitue un sujet de développement constant.
- 20 [0004] A la fois utilisés par les musiciens ou par les designers sonores, des effets sonores qu'ils soient analogiques ou numériques, ne cessent d'être inventés afin d'explorer de nouveaux champs et contribuer à repousser les frontières de la créativité.
- 25 [0005] Un effet bien connu est celui de la réverbération naturellement présente dans les salles de concert, les studios d'enregistrement, et autres lieux d'interprétation, endroits dans lesquels les parois vont réfléchir les ondes acoustiques incidentes avec une perte en amplitude qui est fonction du type de matériaux utilisés.
- 30 [0006] Ainsi, des ondes acoustiques réfléchies vont se juxtaposer et arriver avec un certain décalage auprès des auditeurs (ou systèmes de captation sonore), créant ainsi une expérience sonore immersive.
- 35 [0007] Il existe plusieurs techniques qui permettent de reproduire artificiellement cet effet de réverbération.
- 40 [0008] Tout d'abord, des chambres d'écho ont été développées au début du 20^{ème} siècle pour reproduire la réverbération dans des volumes restreints (studio d'enregistrement, studio radiophonique, etc.).
- 45 [0009] Vinrent ensuite des réverbérations à ressorts qui permirent de reproduire l'effet recherché. En revanche, le résultat obtenu était différent de celui des réverbérations naturelles ou des chambres d'échos, en en faisant un effet à part entière avec une signature sonore propre. De plus, et afin d'obtenir l'effet recherché, il est nécessaire que les ressorts soient assez longs pour obtenir un retard entre les différents échos. Sur un principe similaire à celui des ressorts, la réverbération à plaque a été développée dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle. Cette fois-ci, le son se transmet à travers une plaque métallique dans laquelle des réflexions complexes ont lieu. Le rendu sonore se rapproche alors davantage de l'acoustique des salles présentant une importante réverbération.
- 50 [0010] En revanche, les plaques utilisées sont souvent lourdes et encombrantes ne permettant pas une utilisation aisée.
- 55 [0011] Puis, avec le développement des transistors, les dispositifs décrits précédemment ont pu être remplacés par des lignes à retard entièrement électroniques transmettant le signal analogique avec un délai pouvant atteindre plusieurs millisecondes.
- 60 [0012] Enfin, les effets de réverbérations numériques, qui sont principalement basés sur des algorithmes qui recréent des espaces sonores, voient le jour. Ces effets permettent de simuler l'acoustique de salles telle que des salles de concert, de studios d'enregistrement, ainsi que d'autres effets de réverbération. De plus, ils permettent d'intégrer ces effets dans des éléments compacts, en comparaison avec les exemples physiques cités précédemment.
- 65 [0013] Le document RAMIREZ, M. A. M. et al. *Modeling plate and spring réverbération using a DSP-informed deep neural network*, ICASSP 2020-2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, pages 241 à 245, décrit une méthode pour modéliser les effets de réverbération obtenus dans des ressorts et des plaques. Cette modélisation est basée sur un réseau de neurones pour réaliser notamment un apprentissage profond des effets non linéaires présents dans les réverbérations à ressort et à plaques. En revanche, ce type de modélisation est complexe à mettre en oeuvre, et les résultats obtenus sont une approximation des phénomènes physiques présents dans ces effets de réverbération.
- 70 [0014] Le document BILBAO, S., *Numerical simulation of spring réverbération*, 16th International Conference of Digital Audio Effects, September 2013, décrit un autre type de modélisation de l'effet de réverbération dans des ressorts et qui est basée sur le calcul de différences finies dans le domaine temporel (en anglais *Finite Difference Time Domain, FDTD*) pour modéliser la vibration des ressorts hélicoïdaux. De nouveau, il est difficile de modéliser l'ensemble des effets physiques qui ont lieu dans ce type d'effet de réverbération. Ces modèles, bien que complexes, sont donc incomplets et il apparaît nécessaire d'être notamment vigilant sur leur stabilité numérique afin de converger vers des solutions.
- 75 [0015] Il se pose le problème de développer un dispositif permettant de recréer un effet de réverbération, qui soit peu encombrant tout en garantissant un rendu hautement fidèle de l'effet sonore recherché.

Présentation de l'invention

[0016] La présente invention vise à pallier tout ou partie des inconvénients présentés précédemment, et propose alors un dispositif permettant de recréer un effet de réverbération, ledit dispositif étant doté d'un ressort MEMS.

[0017] Il est précisé ici que le terme MEMS correspond à l'abréviation de l'expression anglaise Microelectromechanical systems, que l'on peut traduire en français par l'expression systèmes micro-électromécaniques. Par ressorts et cellules MEMS, et de façon générale, on entend des composants miniaturisés qui peuvent notamment être utilisés avec des circuits électroniques ou être intégrés dans des dispositifs microélectroniques et y remplir des fonctions équivalentes à des composants classiques.

[0018] Selon un mode de réalisation, la présente invention concerne un dispositif micro-électromécanique de distorsion d'un signal électrique pour recréer un effet de réverbération sonore comportant :

- un connecteur d'entrée pour un signal électrique entrant ;
- un connecteur de sortie pour un signal électrique sortant ;
- un transducteur électromécanique d'entrée couplé au connecteur d'entrée ;
- un transducteur électromécanique de sortie couplé au connecteur de sortie;
- une structure de support ;

ledit dispositif étant doté d'un ressort MEMS comportant une première extrémité, une seconde extrémité, la première extrémité et la deuxième extrémité étant reliées respectivement au transducteur électromécanique d'entrée au moyen d'une articulation au transducteur électromécanique de sortie au moyen d'une autre articulation, le transducteur électromécanique d'entrée, le transducteur électromécanique de sortie et les articulations étant en partie encastrés sur la structure de support, le transducteur électromécanique d'entrée étant configuré pour mettre en mouvement l'articulation.

[0019] Par « couplé » on désigne ici une liaison ou connexion électrique pouvant être directe ou pouvant être indirecte (c'est-à-dire réalisée à travers un ou plusieurs éléments électriques ou composants intermédiaires).

[0020] Avantageusement, le transducteur électromécanique d'entrée et/ou le transducteur électromécanique de sortie comporte(nt) deux lames, en particulier coplanaires, configurées pour appliquer un couple de torsion à l'articulation.

[0021] De façon avantageuse, les lames sont des éléments piézoélectriques.

[0022] Selon une caractéristique particulière de l'invention, le signal électrique entrant est transmis sur l'une des lames du transducteur électromécanique d'entrée, tandis que ledit signal électrique entrant est transmis en opposition de phase sur l'autre lame dudit transducteur.

[0023] Selon une autre caractéristique particulière de l'invention, l'articulation comprend une tige de liaison reliant entre eux un bord d'une lame avec un autre bord de l'autre lame et une tige d'encastrement reliant la structure de support à la tige de liaison. De façon avantageuse, le ressort MEMS est un ressort plat, qui lorsque ledit ressort est au repos, s'étendent entre la première extrémité et la deuxième extrémité dans un même plan.

[0024] Une autre caractéristique particulière est que le ressort MEMS est formé d'une succession de cellules MEMS, chaque cellule formant une ou plusieurs ondulations, avantageusement rectangulaires ou triangulaires, la succession de cellules formant une succession d'ondulations.

[0025] Avantageusement, chaque cellule MEMS est définie par une épaisseur comprise entre 5 et 20 μm , d'une largeur de bande comprise entre 5 et 100 μm , d'une demie-largeur comprise entre 100 μm et 2 mm, et d'un espacement interbande compris entre 5 et 20 μm .

[0026] Avantageusement, les cellules MEMS ont des dimensions qui sont fonction de leur position le long du ressort MEMS.

[0027] Avantageusement, le dispositif comprend en outre au moins un boîtier hermétique dans lequel la structure de support, les transducteurs d'entrée et de sortie et le ressort MEMS sont logés, la pression à l'intérieur du boîtier étant avantageusement comprise entre 0,1 Pa et 100 Pa.

[0028] De façon avantageuse, le dispositif comprend en outre : un circuit imprimé sur lequel, la structure de support et un circuit de traitement analogique relié au connecteur de sortie, sont agencés.

[0029] Un autre objet de l'invention est un système de production sonore comprenant le dispositif micro-électromécanique permettant de recréer un effet de réverbération. Un autre objet de l'invention est un procédé pour la fabrication du dispositif micro-électromécanique, comprenant les étapes suivantes :

- prévoir un support, comprenant, de sa face arrière jusqu'à sa face avant opposée à la face arrière : au moins une première couche semi-conductrice et une deuxième couche semi-conductrice superposées, et revêtir le support d'un empilement comprenant une première couche conductrice, une couche de matériau piézoélectrique et une deuxième couche conductrice,
- structurer l'empilement et la deuxième couche semi-conductrice du support de sorte à réaliser le transducteur

d'entrée et de sortie dans ledit empilement ainsi que les articulations et le ressort MEMS dans la deuxième couche semi-conductrice,

- graver la première couche semi-conductrice par la face arrière du support de sorte à libérer le ressort MEMS, les articulations et les transducteurs d'entrée et de sortie.

5

Présentation des dessins

[0030] Les figures sont données à titre purement illustratif pour une meilleure compréhension de l'invention sans en limiter la portée. Les différents éléments peuvent être représentés de manière schématique et ne sont pas nécessairement à la même échelle. Sur l'ensemble des figures, les éléments identiques ou équivalents portent la même référence numérique.

[0031] Il est ainsi illustré en :

[Fig. 1] : une vue éclatée d'un dispositif pour recréer un effet de réverbération, selon un mode de réalisation de l'invention ;

[Fig. 2] : une vue en perspective du dispositif pour recréer un effet de réverbération ;

[Fig. 3A] : une vue de dessus d'un composant MEMS du dispositif recréant un effet de réverbération, selon un premier mode de réalisation ;

[Fig. 3B] : une vue de dessus d'un composant MEMS du dispositif recréant un effet de réverbération, selon un second mode de réalisation ;

[Fig. 4] : une vue de dessus d'un transducteur et d'une articulation du composant MEMS selon le premier et second mode de réalisation ;

[Fig. 5] : un graphique d'un signal électrique d'une réponse impulsionnelle obtenue au moyen du dispositif ;

[Fig. 6] : trois vues en perspective d'un transducteur du dispositif recréant un effet de réverbération lorsque le transducteur est : en dans sa position d'équilibre (A), dans un mode de vibration en opposition de phase (B), dans un mode de vibration en phase (C) ;

[Fig. 7] : un schéma électrique d'un montage d'amplificateurs différentiels pour extraire certaines composantes du signal produit par le dispositif ;

[Fig. 8A], Figure 8B], Figure 8C] et Figure 8D] : des étapes d'un procédé de fabrication d'un composant MEMS selon l'invention ;

[Fig. 9A] : un graphique des variations temporelles du contenu fréquentiel d'un signal électrique d'une réponse impulsionnelle obtenue au moyen du dispositif, selon un mode de réalisation de l'invention ; et

[Fig. 9B] : un graphique des variations temporelles du contenu fréquentiel d'un signal électrique d'une réponse impulsionnelle obtenue au moyen du dispositif, selon un autre mode de réalisation de l'invention.

45

Description détaillée de modes de réalisation

[0032] La présente invention a notamment pour but de proposer un dispositif de réverbérations à ressort miniaturisé et de type MEMS.

[0033] La figure 1 représente une vue éclatée d'un dispositif 100 recréant un effet de réverbération, et qui comprend un boîtier 11 hermétique composé d'un couvercle 111, préférablement transparent, ledit couvercle recouvrant un circuit imprimé 112, un composant MEMS 12.

[0034] Le composant MEMS 12, qui n'est pas représenté dans son ensemble sur la figure 1 pour une question de lisibilité, comprend une structure 121, un ressort MEMS 122, deux transducteurs 123 et 124, chacun relié respectivement à une extrémité 1222-1223 du ressort MEMS 122 au moyen d'une articulation 125. Le ressort MEMS 122 est quant à lui composé d'une pluralité de cellules MEMS 1221, dont une est représentée avec des hachures sur la figure 1.

[0035] Avantageusement, le ressort MEMS 122 est un ressort plat.

[0036] Dans cet exemple de réalisation, les transducteurs 123 et 124 comprennent respectivement deux lames

piézoélectriques 1231-1232 et 1241-1242. Par exemple, les lames 1231-1232 et 1241-1242 sont en titano-zirconates de plomb (PZT).

[0037] Le circuit imprimé 112 comprend notamment un connecteur d'entrée 1121, pour transmettre un signal d'entrée dit signal « source » au dispositif 100, un connecteur de sortie 1122 pour transmettre un signal de sortie « réverbéré », ce signal réverbéré étant typiquement transmis vers un système externe tel qu'un système de restitution sonore ou d'enregistrement. Le signal « source » est un signal électrique, lui-même résultant d'une conversion ou transduction d'un signal sonore auquel on souhaite ajouter l'effet de réverbération.

[0038] Dans cet exemple, le transducteur 123 est configuré pour convertir un signal électrique d'entrée en vibration mécanique qui se propage le long du ressort MEMS 122, et le transducteur 124 est utilisé pour convertir en signal électrique de sortie les vibrations mécaniques se propageant dans le ressort MEMS 122, ce dernier signal comprenant plusieurs composantes liées aux multiples échos générés au sein du ressort MEMS 122.

[0039] Ainsi, le transducteur 123 est configuré pour mettre en mouvement rotatif l'articulation 125 et cela de préférence de manière proportionnelle au signal électrique d'entrée.

[0040] Les transducteurs 123 et 124 peuvent être utilisés en mode différentiel, c'est-à-dire avec un déphasage de $+/-\pi$ entre les lames 1231-1232 et 1241-1242, ou en mode commun, soit avec un déphasage nul entre les lames 1231-1232 et 1241-1242. Dans le premier cas, on peut par exemple prévoir un amplificateur opérationnel pour mettre en oeuvre ce déphasage.

[0041] La séparation des modes communs et différentiels peut être mise en oeuvre aussi bien à l'entrée qu'en sortie du dispositif 100.

[0042] Enfin, les transducteurs 123 et 124 agissent comme des impédances de terminaison. Afin de produire l'effet de réverbération, c'est-à-dire par la présence d'échos dans le ressort MEMS 122, les impédances de torsion mécanique des transducteurs 123 et 124 sont de préférence différentes de l'impédance mécanique caractéristique de dudit ressort. Pour modéliser le comportement dynamique du dispositif 100, et dimensionner le composant MEMS 12, une analogie avec les impédances de terminaison d'une ligne de transmission peut être faite.

[0043] La figure 2 représente une vue en perspective du dispositif 100 et lorsque le boîtier 11 est complètement fermé. Comme pour la figure 1, et pour une question de lisibilité, le composant MEMS 12 n'est pas représenté dans son ensemble sur la figure 2.

[0044] Afin de limiter les pertes thermovisqueuses à l'intérieur du boîtier 11, lesdites pertes dissipant l'énergie mécanique dans le ressort MEMS 122 lorsqu'il vibre, préféablement un vide entre 0,1 Pa et 100 Pa est réalisé dans le boîtier 11.

[0045] Dans d'autres modes de réalisation, le volume intérieur du boîtier est rempli d'un gaz à une pression donnée permettant de minimiser les pertes thermovisqueuses.

[0046] Ainsi, et en réduisant les pertes thermovisqueuses, le facteur de qualité Q, qui se définit comme étant le rapport entre l'énergie maximale contenue dans une cellule MEMS 1221 et l'énergie qui est dissipée par cette même cellule sur une période d'oscillation, augmente. Préféablement, et pour obtenir un nombre d'échos pour générer l'effet sonore recherché, il est préférable que le facteur de qualité Q d'une cellule MEMS 1221 soit supérieur à 100.

[0047] Comme précisé précédemment, le ressort MEMS 122 est relié, de manière solidaire, à chacune de ses extrémités 1222-1223 à des articulations 125, ces articulations étant elles-mêmes reliées de manière solidaire aux transducteurs 123 et 124. Comme le montre la figure 2, les transducteurs 123 et 124 ainsi que les articulation 125 sont en partie encastrée sur la structure 121 du composant MEMS 12.

[0048] Ces encastrements sont représentés par les zones 126 en trait en pointillé sur la figure 2.

[0049] Ainsi, ces encastrements vont contraindre les mouvements des transducteurs 123 et 124 ainsi que les mouvements des articulations 125 pour obtenir le type de vibrations souhaité au niveau du ressort MEMS 122. Préféablement, le ressort MEMS 122 est mis en mouvement au moyen du transducteur 123 afin de produire des mouvements de torsion autour de sa position d'équilibre. Les lames 1231 et 1232 peuvent être actionnées en opposition de phase afin de favoriser ce mode de vibration du ressort MEMS 122. Dans d'autres modes de réalisation, les lames 1231 et 1232 sont actionnées en phase et en y appliquant une même charge afin de favoriser la propagation d'un mode de vibration longitudinal et de flexion au sein du ressort MEMS 122.

[0050] Pour transmettre le signal d'entrée au transducteur 123, des pistes électriques (non représentées ici) sont présentes sur le circuit imprimé 112 et relient le connecteur d'entrée 1121 au transducteur 123. Il est en de même pour le connecteur de sortie 1122 et le transducteur 124.

[0051] Enfin, dans un exemple de réalisation particulier, le circuit imprimé 112 a une épaisseur e112 de 600 μm , une longueur L112 inférieure à 10 mm, une largeur 1112 de l'ordre de 5 mm, et le couvercle 111 a une épaisseur e111 d'au moins 1 mm. Ainsi, et de par les matériaux utilisés et ses dimensions, le dispositif 100 est donc extrêmement compact et très léger, en comparaison avec les systèmes existants de réverbération qui utilisent typiquement des ressorts ayant une longueur de plusieurs dizaines de centimètre. Le dispositif 100 a également pour particularité de ne requérir qu'une faible consommation électrique, en comparaison aux réverbérations à ressort simulées qui nécessitent d'alimenter un processeur de signal numérique (de l'anglais « Digital Signal Processor », DSP). Par ailleurs, la conception du dispositif 100

permet d'obtenir un facteur de qualité élevé.

[0052] Avantageusement, et grâce à ses faibles dimensions, le dispositif 100 est directement intégrable dans des systèmes de production sonore, tels que des instruments de musiques, des amplificateurs de guitare ou de basse mais aussi des enceintes acoustiques, ou comme effet sonore complémentaire dans des pédales d'effet.

[0053] La figure 3A représente une vue de dessus du composant MEMS 12.

[0054] Pour une question de lisibilité, le dispositif 100 étant un dispositif miniaturisé, le composant MEMS 12 n'est pas représenté dans son ensemble sur la figure 3A. De plus, les différents éléments du composant MEMS 12 n'y sont volontairement pas représentés à l'échelle pour mieux identifier les paramètres de dimensionnement du ressort MEMS 121.

[0055] De plus, les positions des encastrements des transducteurs 123 et 124 ainsi que des articulations 125 au niveau des zones 126 de la structure 121 sont plus facilement visibles sur la figure 3A.

[0056] Les articulations 125 comprennent une tige de liaison 125a reliant entre eux un bord libre de la lame 1231 avec un bord libre de l'autre lame 1232, ou un bord libre de la lame 1241 avec un bord libre de l'autre lame 1242, ainsi qu'une tige d'encastrement 125b reliant la structure 121 de support à la tige de liaison 125a. Dans l'exemple de réalisation particulier illustré, le bord libre des lames est un bord latéral.

[0057] Toutefois, en variante, on peut prévoir les tiges 125a, 125b respectivement sur un bord inférieur de la lame 1231 et sur un bord inférieur de l'autre lame 1232 ou respectivement sur un bord supérieur.

[0058] Comme présenté précédemment, le ressort MEMS 121 comporte un nombre n de cellules MEMS 1221, dont une est délimitée sur la figure 3A par des traits en pointillé.

[0059] Dans un mode de réalisation, la cellule MEMS 1221 est formée d'une ou plusieurs d'ondulations de forme rectangulaires ou carrées. Chaque ondulation peut être formée comme sur la figure 3A, d'une succession de premières bandes qui s'étendent dans une première direction et reliées entre elles deux-à-deux par des deuxièmes bandes dans une deuxième direction orthogonale à la première direction. On définit sur cette figure une largeur de bande W_p , un espace interbande i_t entre deux premières bandes et une demi-largeur L_p des premières bandes. Dans l'exemple illustré, la cellule MEMS 1221 a une longueur totale L_{cell} qui correspond à deux aller-retours ou deux ondulations successives, comme cela est visible sur la figure 3A. De plus la cellule MEMS 1221 est définie par une épaisseur t_m (non représentée ici).

[0060] Les extrémités 1222 et 1223 du ressort MEMS 121 sont caractérisées respectivement par une longueur L_{ai} et une longueur L_{ao} .

[0061] Préférablement, le ressort MEMS 121 est dimensionné de telle sorte que les échos sont produits avec un délai $d_e = 25$ ms, tel que cela est représenté à la figure 5.

[0062] A titre d'exemple, et sans que cela ne présente une limite à l'invention, le tableau 1 ci-dessous résume des dimensions d'une cellule MEMS 1222 permettant d'obtenir un délai $d_e = 25$ ms entre deux échos.

[Table. 1]

Paramètre	Valeur
Epaisseur de la cellule MEMS, t_m (μm)	5
Espace interbande, i_t (μm)	5
Largeur de la bande, W_p (μm)	5
Demie-largeur de la cellule MEMS, L_p (mm)	1000
Longueur de la première extrémité du ressort MEMS, L_{ai} (μm)	5
Longueur de la seconde extrémité du ressort MEMS, L_{ao} (μm)	5
Longueur totale d'une cellule MEMS, L_{tot} (μm)	45
Nombre de cellule MEMS, n	100
Longueur du ressort MEMS (μm)	4015

[0063] Ainsi, et pour les dimensions données dans le tableau 1, le composant MEMS 12, qui pour rappel est la partie active du dispositif 100 dans laquelle l'effet de réverbération est généré, a une longueur L_{12} qui est inférieure à 5 mm, et une largeur 112 qui est inférieure à 3 mm.

[0064] Plus généralement, l'espacement interbande i_t est compris entre 5 et 20 μm , l'épaisseur t_m est comprise entre 5 et 20 μm , la largeur de bande W_p est comprise entre 5 et 100 μm , la demi-largeur L_p est comprise entre 100 μm et 2 mm.

[0065] Dans d'autres modes de réalisation, la cellule MEMS 1221 est formée d'une succession d'ondulations triangulaires, comme cela est montré à la figure 3B.

[0066] La figure 4 représente une vue de dessus du transducteur 123 et de l'articulation 125. La description qui suit de la

figure 4 est également valable pour le transducteur 124. La forme pentagonale des lames 1231 et 1232 permet d'alléger la structure et donc d'augmenter la fréquence de résonance de ces éléments afin d'élargir la bande passante.

[0067] Cette forme pentagonale est définie par une largeur de base W_a , une largeur sommitale W_{a1} qui est inférieure à la largeur de base W_a , une hauteur L_a , et une hauteur partielle L_{a1} .

[0068] Ces dimensions sont optimisées dans le but d'obtenir un maximum de déplacement ou d'angle de déformation de l'extrémité des lames 1231 et 1232, comme cela est montré à la figure 5 en (B) et (C), tout en minimisant la surface desdites lames.

[0069] Par ailleurs, la minimisation de la surface des lames 1231-1232 et 1241-1242 contribue à la faible consommation d'énergie du dispositif 100.

[0070] L'articulation 125, représentée par les hachures sur la figure 4, est quant à elle préférablement en forme de T , et est fabriquée dans la même couche que les lames 1231-1232 et 1241-1242. L'articulation est définie par une largeur W_k de la tige de d'encastrement 125b, une longueur l_k de la tige d'encastrement 125b et une longueur L_k de la tige de liaison 125a.

[0071] A titre d'exemple, et sans que cela ne présente une limite à l'invention, le tableau 2 ci-dessous résume des dimensions possibles des transducteurs 123 et 124 et de l'articulation 125.

15

[Table. 2]

Paramètre	Valeur
Largeur de base de la lame, W_a (μm)	400
Largeur sommitale de la lame, W_{a1} (μm)	200
Hauteur de la lame, L_a (μm)	800
Hauteur partielle de la lame, L_{a1} (μm)	400
Largeur de la tige de d'encastrement, W_k (μm)	5
Longueur de la tige d'encastrement, l_k (μm)	200
Longueur de la tige de liaison, L_k (μm)	415

[0072] La figure 5 représente un graphique 300 d'un signal de sortie 30 d'une réponse impulsionnelle obtenue au moyen du dispositif 100. Dans cet exemple, un signal impulsionnel est utilisé pour illustrer l'effet de réverbération généré par le dispositif 100.

[0073] L'axe des abscisses représente l'échelle des temps t , allant de 0 à 200 ms, et l'axe des ordonnées représente la tension relative V_{out} du signal de sortie 30.

[0074] Le signal de sortie 30 est composé d'une première partie 301 qui correspond au signal impulsionnel transmis directement à travers le ressort MEMS 122, et d'une seconde partie 302 dans laquelle il est possible de voir les multiples échos qui, se superposant vont créer l'effet de réverbération recherché.

[0075] Sur la figure 5, le premier délai d_0 correspond au temps de propagation du signal à travers le ressort MEMS 122, et le second délai d_e correspond au délai entre deux échos successifs 3021 et 3022.

[0076] En modifiant les paramètres listés dans le tableau 1, les propriétés du ressort MEMS 122 peuvent alors être optimisées pour obtenir l'effet de réverbération recherché. Ainsi, et à titre d'exemple, le délai d_e entre deux échos successifs 3021 et 3022 est directement fonction du nombre n de cellules MEMS 1221 : le délai d_e augmentant linéairement en fonction du nombre n .

[0077] La figure 6 représente trois vues en perspective du transducteur 123 lorsque celui-ci se trouve dans différentes positions afin d'illustrer ses principaux modes de vibration.

[0078] Tout d'abord, la figure 6 en (A) représente le transducteur 123 dans sa position d'équilibre. Dans cette position, les lames 1231 et 1232 sont alignées et ne présentent pas de déformations liées à des vibrations.

[0079] Ensuite, la figure 6 en (B) représente le transducteur 123, lorsque celui-ci vibre dans un mode dit « différentiel », et qui correspond à la propagation dans le ressort MEMS 122 d'une onde de torsion. Les lames 1231 et 1232 oscillent alors en opposition de phase autour de leur position d'équilibre, vue en (A) et schématisée par une ligne en pointillé représentant un axe des ordonnées z .

[0080] Ensuite, la figure 6 en (C) représente le transducteur 123, lorsque celui-ci vibre dans un mode dit « commun », c'est à dire un mode où les lames 1231 et 1232 oscillent en phase autour de leur position d'équilibre, également schématisée ici par une ligne en pointillé représentant un axe des ordonnées z . Une même différence de potentiels est de plus appliquée sur les lames 1231 et 1232. Au niveau du ressort MEMS 122, cela correspond à la propagation d'une combinaison d'une onde longitudinale et de flexion.

[0081] La figure 7 représente un schéma électrique 500 d'un montage de traitement analogique 50 comprenant des amplificateurs différentiels 51 pour extraire certaines composantes du signal produit par le dispositif. Ce montage permet

de n'exploiter par exemple que le mode de vibration différentiel du transducteur 124, afin de ne conserver que la composante du signal provenant du mode de torsion du ressort MEMS 122.

[0082] Dans le mode de réalisation préféré de l'invention, le montage de traitement analogique 50 comprend deux entrées réceptionnant les signaux V1in et V2in provenant respectivement des conversions mécano électriques au niveau des lames 1241 et 1242 du transducteur 124.

[0083] En sortie du montage de traitement analogique 50, un signal de sortie Vout est obtenu, comme représenté à la figure 5.

[0084] De plus, le montage de traitement analogique 50 comprend un gain, représenté sur le schéma électrique 500 par une résistance Rgain et qui permet à un utilisateur de modifier la contribution des modes de torsion et de flexions présents dans le ressort MEMS 122 lorsqu'il vibre.

[0085] Un exemple de réalisation particulier d'un procédé de fabrication d'un composant MEMS 12 tel que décrit précédemment va à présent être donné en liaison avec les figures 8A-8D.

[0086] Une structure de départ possible est illustrée sur la figure 8A, avec une plaque (« wafer » selon la terminologie anglosaxonne) de type BESOI (pour « bonding and etch back silicon-on-insulator », i.e. silicium sur isolant collé et gravé en face arrière), comportant deux couches semi-conductrices 202, 204, superposées, par exemple en silicium, ici séparées par une couche de séparation typiquement isolante et par exemple d'oxyde de silicium 203.

[0087] Le ressort MEMS 122 est destiné à être formé dans une couche semi-conductrice supérieure 204, typiquement la plus fine des couches semi-conductrices 202, 204. De même les articulations 125 des transducteurs 123 et 124 peuvent être formées dans cette couche 204, ainsi qu'au moins une partie de la structure 121 d'ancrage. On peut ainsi prévoir de réaliser au moins partiellement tous les éléments mobiles dans la couche supérieure 204. La couche semi-conductrice 202 inférieure peut être prévue ici pour former le cadre.

[0088] Sur la couche semi-conductrice 204 la plus fine située en face avant FAV de la plaque, un empilement comprenant :

- 25 - une première couche d'électrode 222, par exemple en Pt ;
- une couche 224 de matériau piézoélectrique, par exemple du PZT ; puis
- une seconde couche d'électrode 226, par exemple en Pt ; est déposé.

[0089] Comme illustré sur la figure 8B, cet empilement est ensuite structuré pour former les transducteurs piézoélectriques. Les transducteurs piézoélectriques sont quant à eux définis par gravure. Un masquage 201A, par exemple formé à partir d'une couche 201 d'oxyde de silicium disposée en face arrière FAR est ici prévu et également structuré en vue de réaliser ultérieurement une étape de gravure profonde par cette face arrière FAR.

[0090] Comme illustré sur la figure 8C, une gravure de la couche de silicium 204 de sorte à définir le ressort MEMS 122 et les articulations 125 des transducteurs 123 et 124 est ensuite effectuée.

[0091] Préalablement à cette définition on protège typiquement les transducteurs par une couche de passivation 231, par exemple en oxyde de silicium, à travers laquelle on pratique des ouvertures pour des contacts électriques 252b, 252a permettant respectivement l'alimentation électrique des électrodes supérieures et inférieures des transducteurs piézoélectriques. Un matériau conducteur, par exemple tel que de l'au est déposé pour former les contacts.

[0092] Ensuite, et comme illustré sur la figure 8D, une étape de gravure profonde de la face arrière FAR de la plaque afin de libérer le ressort MEMS 122 et la structure déformable avec les transducteurs 123 et 124 est ensuite effectuée. On grave ainsi ici la couche de semi-conductrice 202 inférieure.

[0093] La figure 9A et la figure 9B représentent respectivement un graphique 500a et un graphique 500b qui illustrent des exemples des variations temporelles des contenus fréquentiels 50a et 50b de signaux électriques de réponses impulsionales obtenues au moyen du dispositif selon deux modes de réalisation distincts de l'invention.

[0094] La figure 9A est le spectrogramme obtenu pour un dispositif 100 comportant 200 cellules MEMS 1221.

[0095] La figure 9B est le spectrogramme obtenu pour un dispositif 100 comportant 100 cellules MEMS 1221.

[0096] Sur les figures 9A et 9B, on peut constater notamment l'effet dispersif selon l'axe des temps *t*, où le temps de propagation au sein du dispositif 100 diffère en fonction de la fréquence *f*.

50

Revendications

1. Dispositif (100) micro-électromécanique de distorsion d'un signal électrique pour recréer un effet de réverbération sonore comportant:

- 55 - un connecteur d'entrée (1121) pour un signal électrique entrant ;
- un connecteur de sortie (1122) pour un signal électrique sortant ;
- un transducteur électromécanique d'entrée (123) couplé au connecteur d'entrée (1121) ;

- un transducteur électromécanique de sortie (124) couplé au connecteur de sortie (1122) ;
 - une structure (121) de support ;
 - ledit dispositif étant doté d'un ressort MEMS (122) comportant une première extrémité (1222), une seconde extrémité (1223), la première extrémité et la deuxième extrémité étant reliées respectivement au transducteur électromécanique d'entrée (123) au moyen d'une articulation (125) au transducteur électromécanique de sortie (124) au moyen d'une autre articulation (125), le transducteur électromécanique d'entrée (123), le transducteur électromécanique de sortie (124) et les articulations (125) étant en partie encastrés sur la structure (121) de support, le transducteur électromécanique d'entrée (123) étant configuré pour mettre en mouvement l'articulation (125).

- 5
- 10 2. Dispositif selon la revendication 1, dans lequel le transducteur électromécanique d'entrée (123) et/ou le transducteur électromécanique de sortie (124) comporte(nt) deux lames (1231,1232,1241,1242), en particulier coplanaires, configurées pour appliquer un couple de torsion à l'articulation
- 15 3. Dispositif selon la revendication 2, dans lequel les lames (1231,1232,1241,1242) sont des éléments piézoélectriques.
4. Dispositif selon l'une des revendications 2 ou 3, dans lequel le signal électrique entrant est transmis sur l'une des lames (1231,1232) du transducteur électromécanique d'entrée (123), tandis que ledit signal électrique entrant est transmis en opposition de phase sur l'autre lame (1231,1232) dudit transducteur.
- 20 5. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'articulation (125) comprend une tige de liaison (125a) reliant entre eux un bord d'une lame (1231,1241) avec un autre bord de l'autre lame (1232,1242) et une tige d'encastrement (125b) reliant la structure (121) de support à la tige de liaison (125a).
- 25 6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le ressort MEMS (122) est un ressort plat, qui lorsque ledit ressort est au repos, s'étendent entre la première extrémité (1222) et la deuxième extrémité (1223) dans un même plan.
- 30 7. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le ressort MEMS (122) est formé d'une succession de cellules MEMS (1221), chaque cellule formant une ou plusieurs ondulations, avantageusement rectangulaires ou triangulaires, la succession de cellules formant une succession d'ondulations.
8. Dispositif selon la revendication 7, dans lequel chaque cellule MEMS (1221) est définie par une épaisseur (tm) comprise entre 5 et 20 μm , d'une largeur de bande (Wp) comprise entre 5 et 100 μm , d'une demie-largeur (Lp) comprise entre 100 μm et 2 mm, et d'un espacement interbande (it) compris entre 5 et 20 μm .
- 35 9. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 7 à 8, dans lequel les cellules MEMS (1221) ont des dimensions qui sont fonction de leur position le long du ressort MEMS (122).
- 40 10. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, comprenant en outre au moins un boîtier (11) hermétique dans lequel la structure (121) de support, les transducteurs d'entrée (123) et de sortie (124) et le ressort MEMS (122) sont logés, la pression à l'intérieur du boîtier (11) étant avantageusement comprise entre 0,1 Pa et 100 Pa.
- 45 11. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, comprenant en outre : un circuit imprimé (112) sur lequel, la structure (122) de support (121) et un circuit de traitement analogique (50) relié au connecteur de sortie (1122), sont agencés.
- 50 12. Système de production sonore **caractérisé en ce qu'il** comprend un dispositif micro-électromécanique (100) pour recréer un effet de réverbération selon l'une quelconque des revendications précédentes
13. Procédé pour la fabrication d'un dispositif selon l'une des revendications 1 à 11, comprenant les étapes suivantes :
- 55 - prévoir un support, comprenant, de sa face arrière (FAR) jusqu'à sa face avant (FAV) opposée à la face arrière : au moins une première couche semi-conductrice (201) et une deuxième couche semi-conductrice (202) superposées, et revêtir le support d'un empilement comprenant une première couche conductrice (222), une couche de matériau piézoélectrique (224) et une deuxième couche conductrice (226),
 - structurer l'empilement et la deuxième couche semi-conductrice (204) du support de sorte à réaliser le

EP 4 576 067 A1

transducteur d'entrée (123) et de sortie (124) dans ledit empilement ainsi que les articulations (125) et le ressort MEMS (122) dans la deuxième couche semi-conductrice (204),

- graver la première couche semi-conductrice (202) par la face arrière (FAR) du support de sorte à libérer le ressort MEMS (122), les articulations (125) et les transducteurs d'entrée (123) et de sortie (124).

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

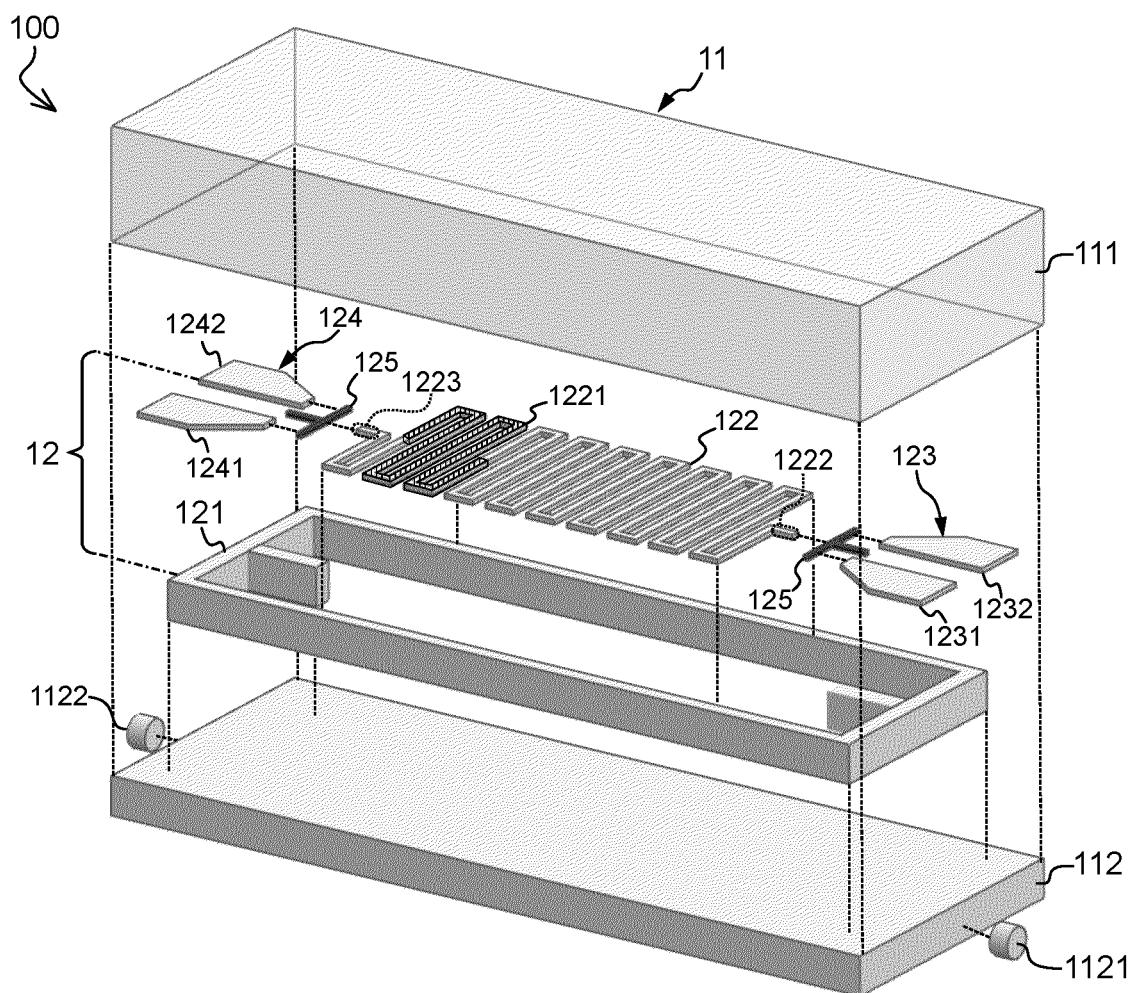


Fig.1

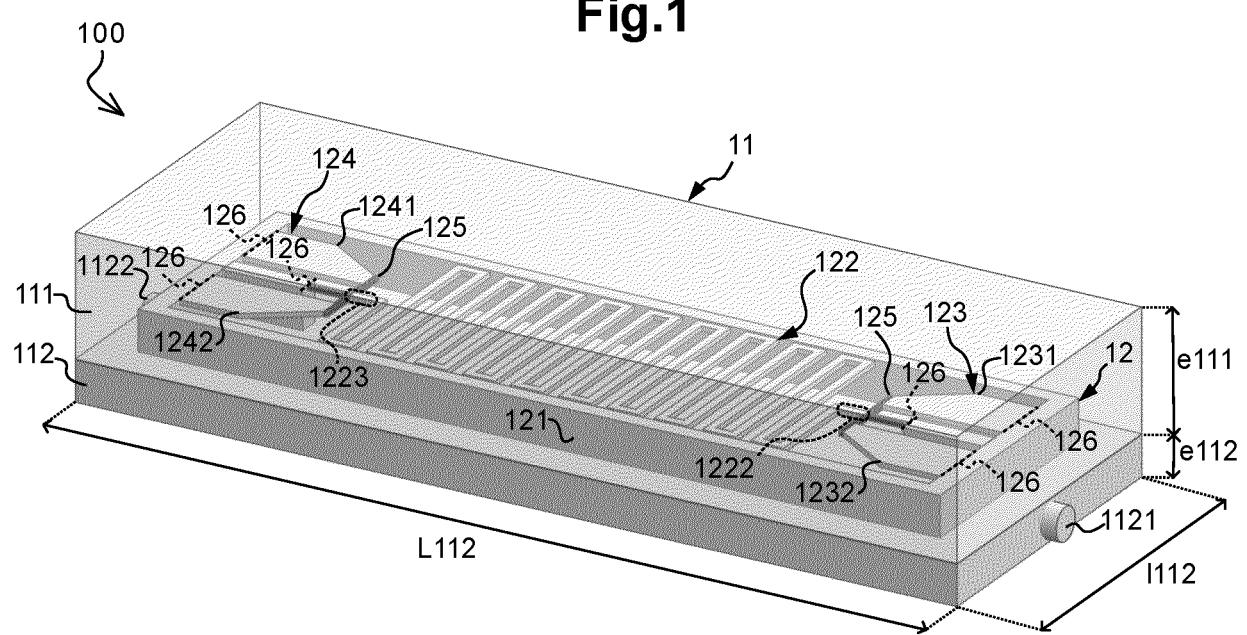


Fig.2

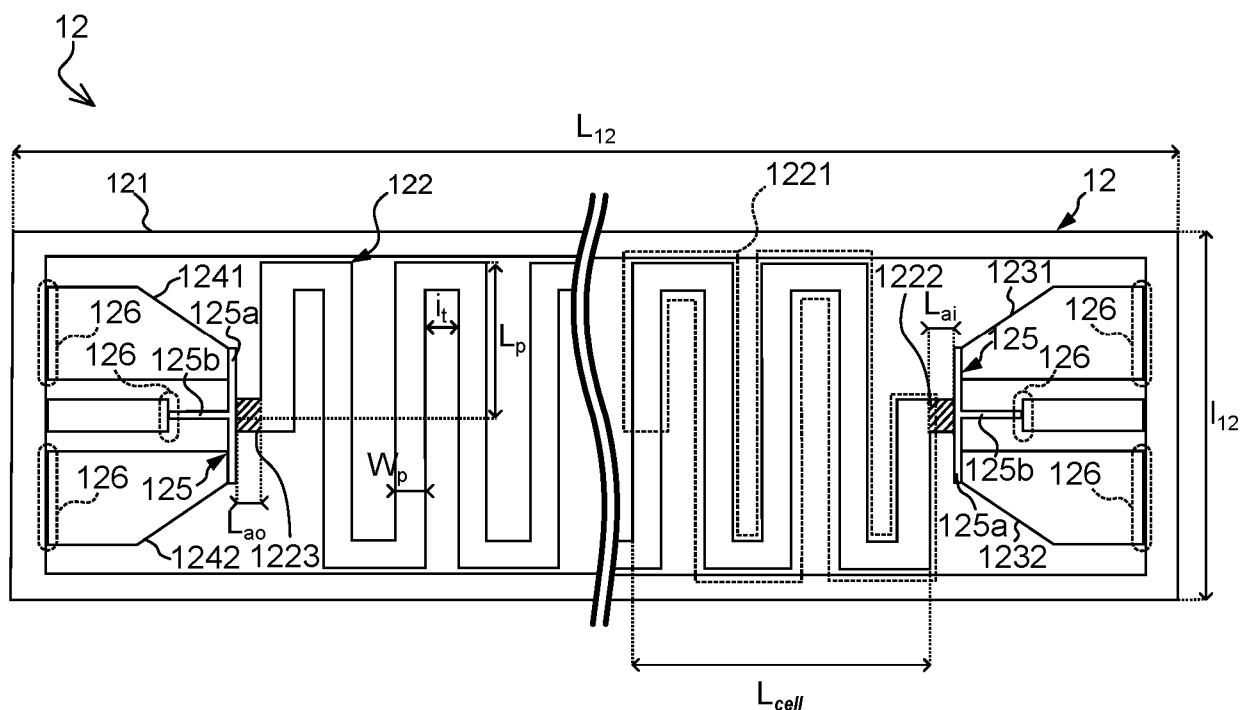


Fig.3A

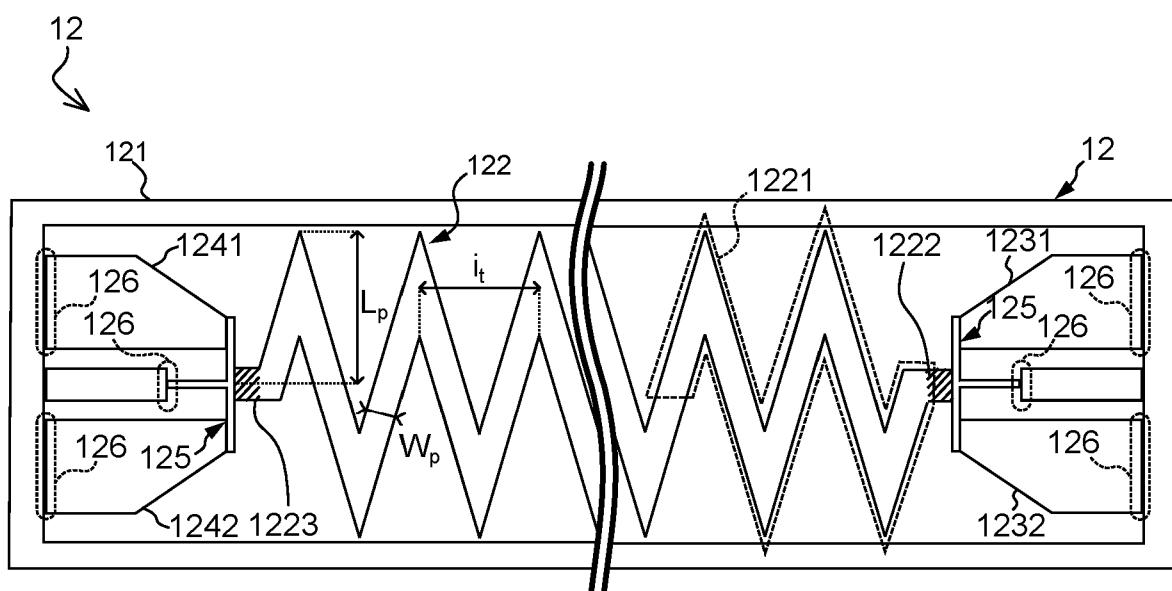


Fig.3B

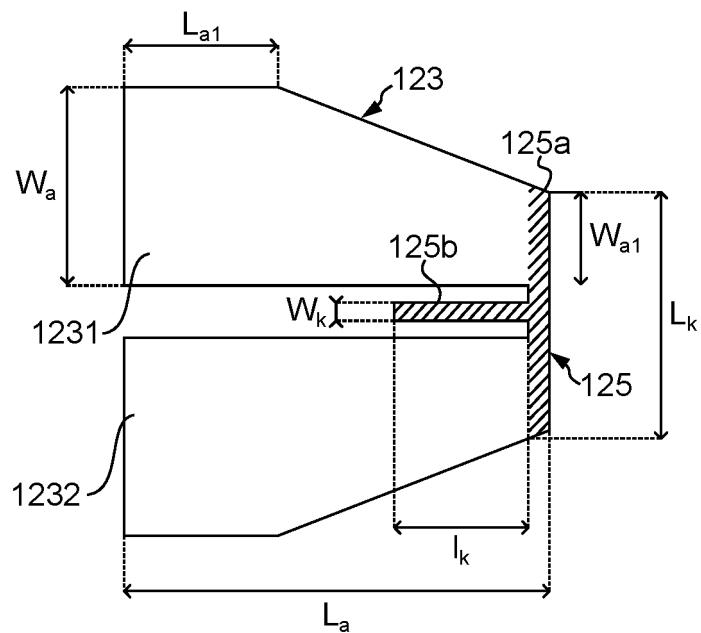


Fig.4

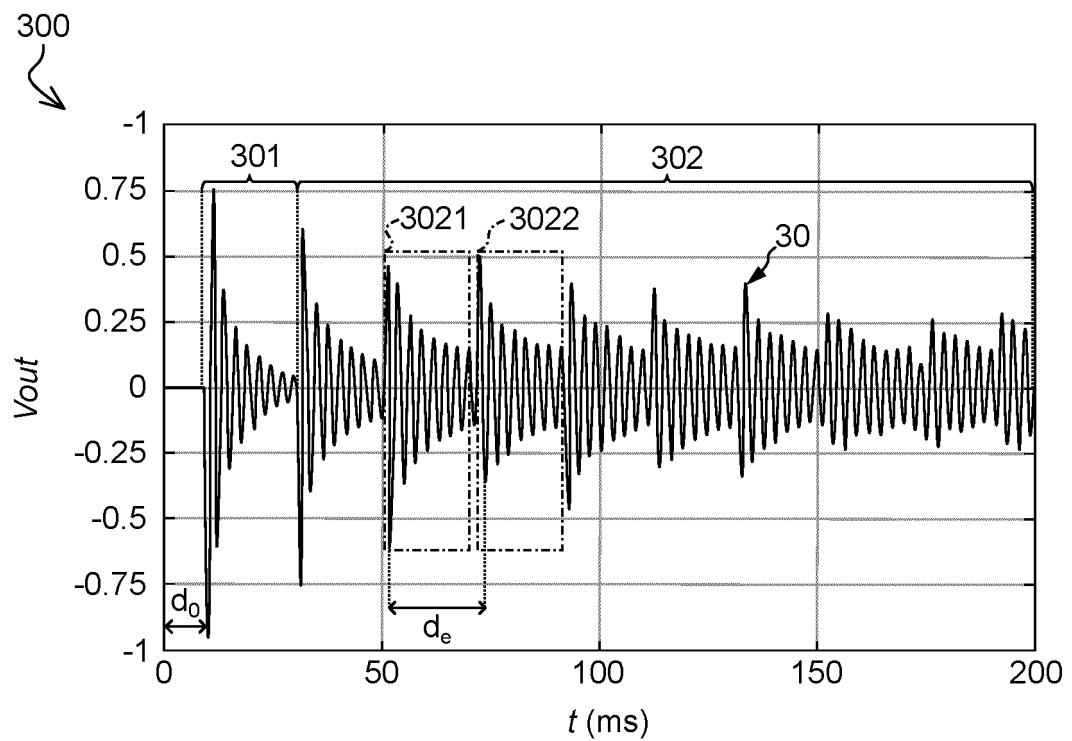


Fig.5

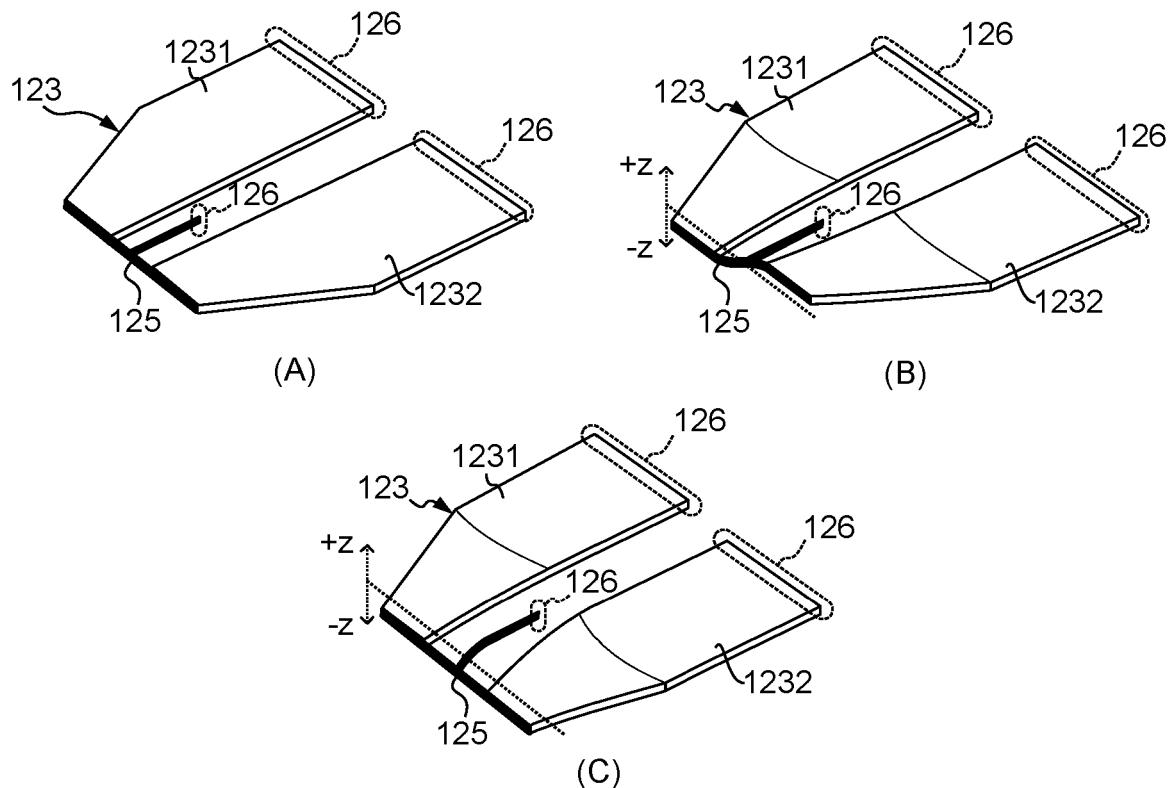


Fig.6

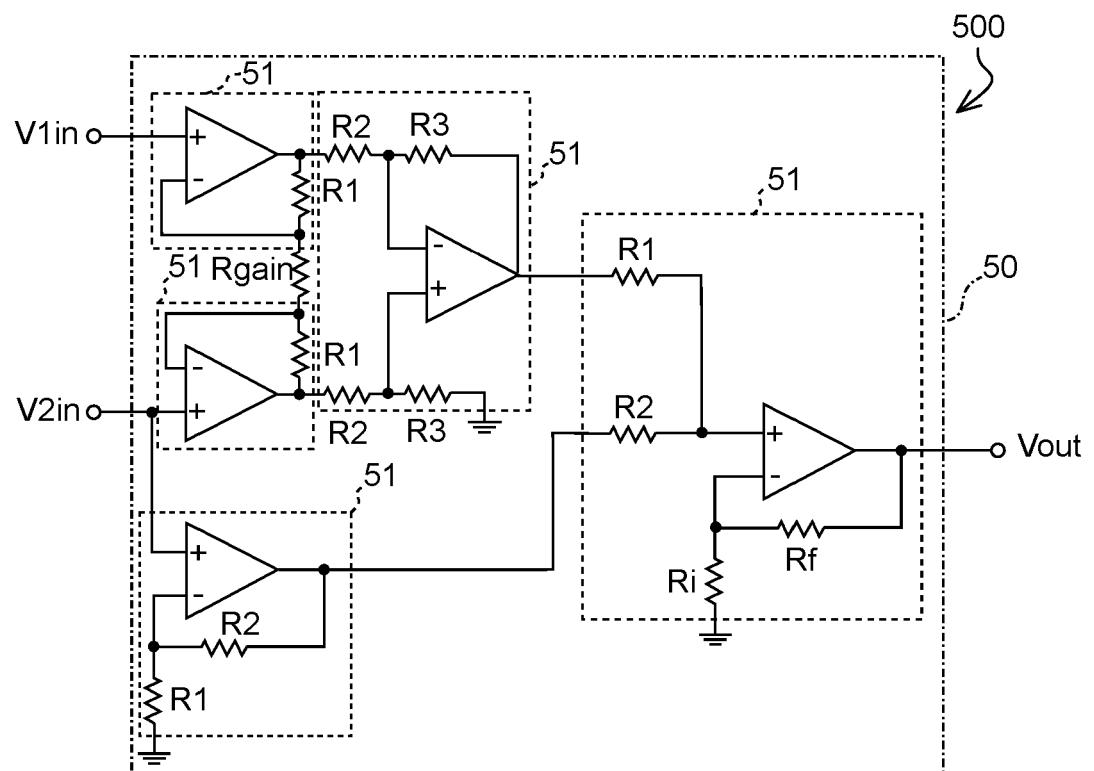


Fig.7

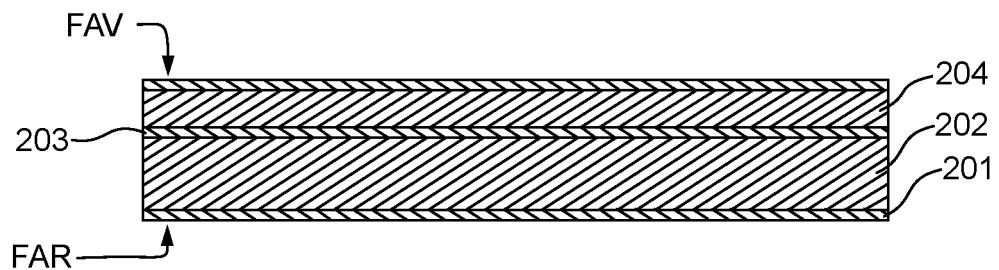


Fig.8A

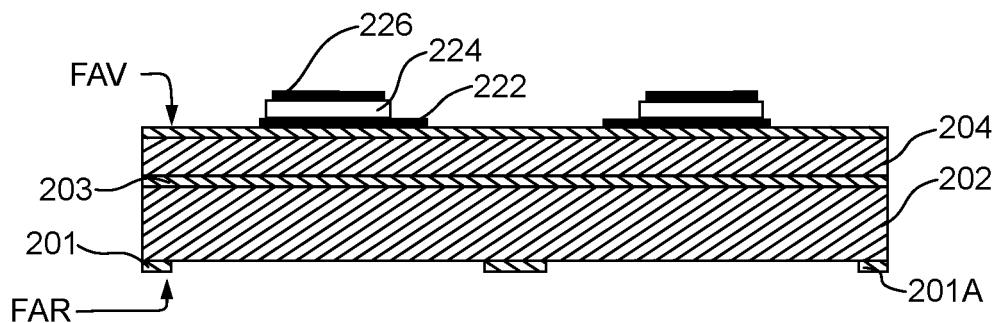


Fig.8B

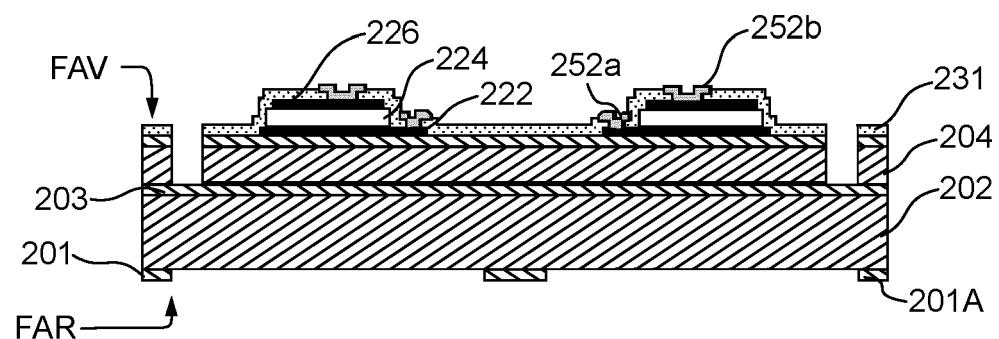


Fig.8C

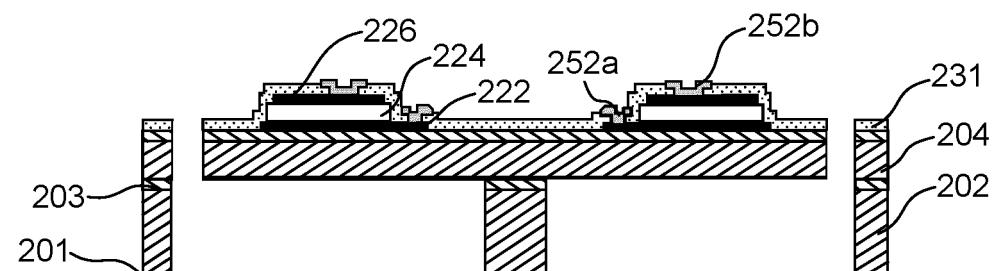


Fig.8D

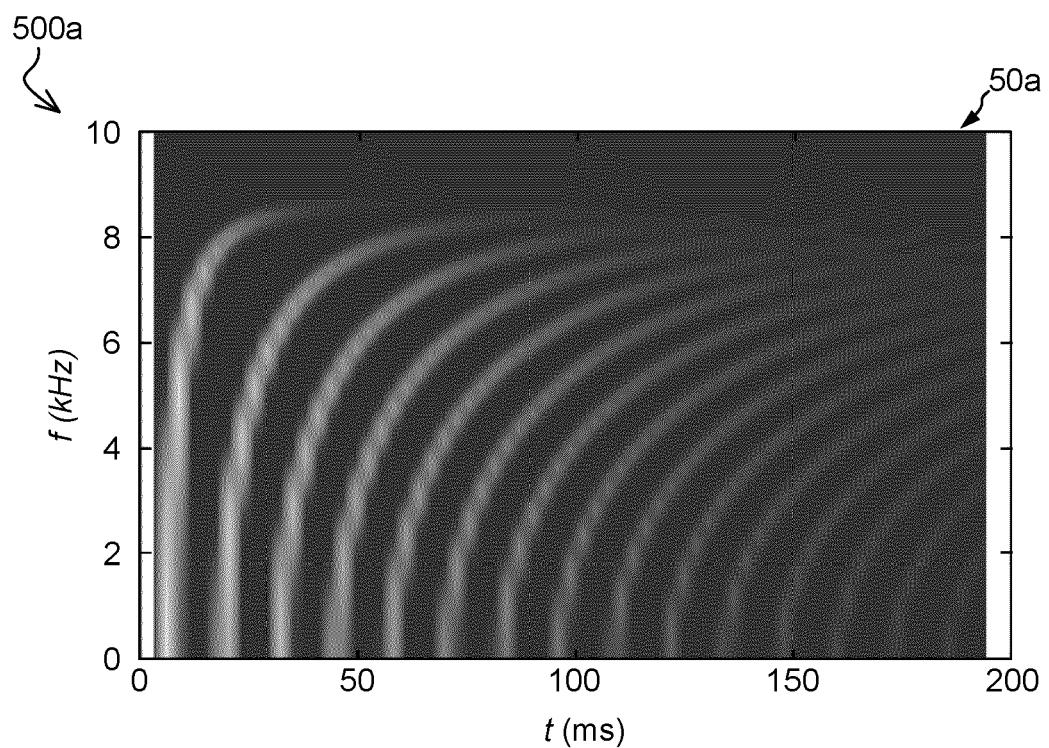


Fig.9A

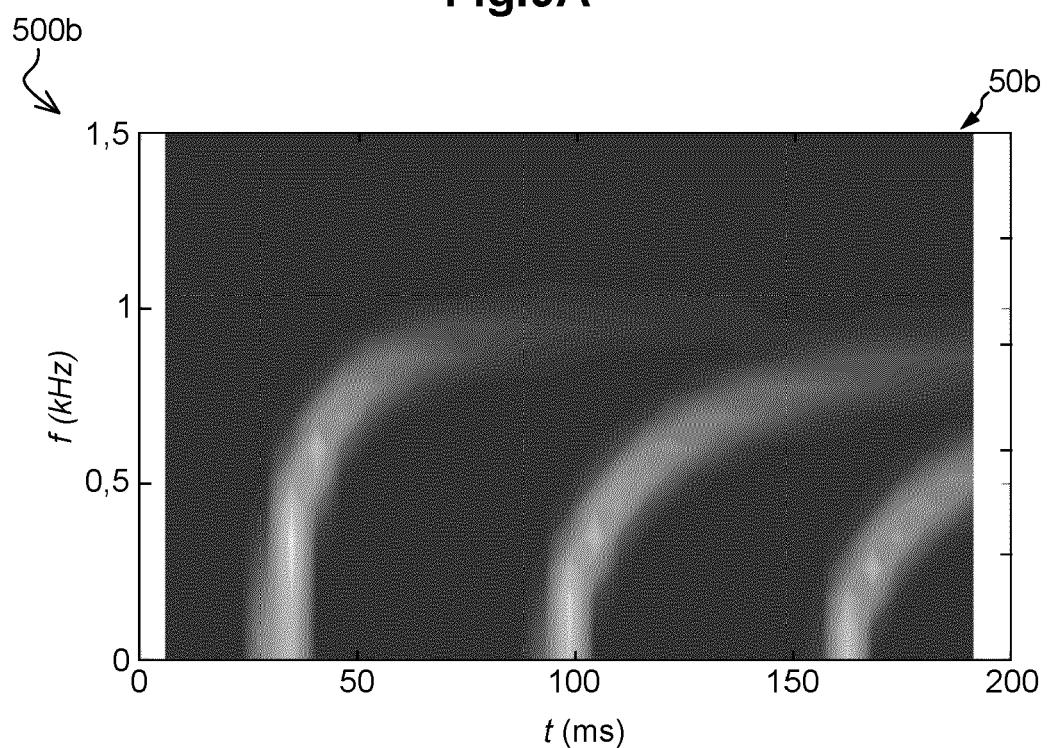


Fig.9B



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS					
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)		
X	US 3 199 053 A (BUNGER DAVID A) 3 août 1965 (1965-08-03)	1,10-13	INV. G10K15/10		
A	* figures 1,2,3 * * colonnes 1-10 * -----	2-9			
A	Parker Julian ET AL: "SPRING REVERBERATION: A PHYSICAL PERSPECTIVE", , 1 septembre 2009 (2009-09-01), pages 1-6, XP093187671, Extrait de l'Internet: URL:https://dafx.de/paper-archive/2009/pap ers/paper_84.pdf [extrait le 2024-07-22] * abrégé * * figures 1-8 * * pages 1-4 * -----	1-13			
A	LIU GUO HUA ET AL: "Micro-Spring's Variable Stiffness Design and Characteristics Analysis", KEY ENGINEERING MATERIALS, TRANS TECH PUBLICATIONS , vol. 645-646 18 mai 2015 (2015-05-18), pages 830-835, XP093187750, CH ISSN: 1662-9795, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.645-646.830 Extrait de l'Internet: URL:https://www.scientific.net/KEM.645-646 .830.pdf [extrait le 2024-07-22] * abrégé * * figures 1-4,7-12 * * pages 830-835 * -----	1-13	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC) G10K		
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications					
Lieu de la recherche	Date d'achèvement de la recherche	Examinateur			
La Haye	27 janvier 2025	Meyer, Matthias			
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES					
X : particulièrement pertinent à lui seul	T : théorie ou principe à la base de l'invention				
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie	E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date				
A : arrière-plan technologique	D : cité dans la demande				
O : divulgation non-écrite	L : cité pour d'autres raisons				
P : document intercalaire	& : membre de la même famille, document correspondant				

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 24 21 9157

5 La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

27-01-2025

10	Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
15	US 3199053 A	03-08-1965	DE 1299728 B GB 1121135 A US 3199053 A	24-07-1969 24-07-1968 03-08-1965
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Littérature non-brevet citée dans la description

- **RAMIREZ, M. A. M. et al.** Modeling plate and spring réverbération using a DSP-informed deep neural network. *ICASSP 2020-2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 241-245 [**0013**]
- Numerical simulation of spring réverbération. **BILBAO, S.** International Conference of Digital Audio Effects. September 2013 [**0014**]