(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

COURBEVOIE

(11) **N° de publication :** ***3 104 861***

(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) **N° d'enregistrement national :** **19 14510**

(51) Int Cl[8] : ***H 03 H 9/02*** *(2019.12)*

(12) **DEMANDE DE BREVET D'INVENTION** **A1**

(22) **Date de dépôt :** 16.12.19.

(30) **Priorité :**

(43) **Date de mise à la disposition du public de la demande :** 18.06.21 Bulletin 21/24.

(56) **Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire :** *Se reporter à la fin du présent fascicule*

(60) **Références à d'autres documents nationaux apparentés :**

◯ **Demande(s) d'extension :**

(71) **Demandeur(s) :** *COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public* — FR.

(72) **Inventeur(s) :** SANSA PERNA Marc et ROBERT Philippe.

(73) **Titulaire(s) :** COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public.

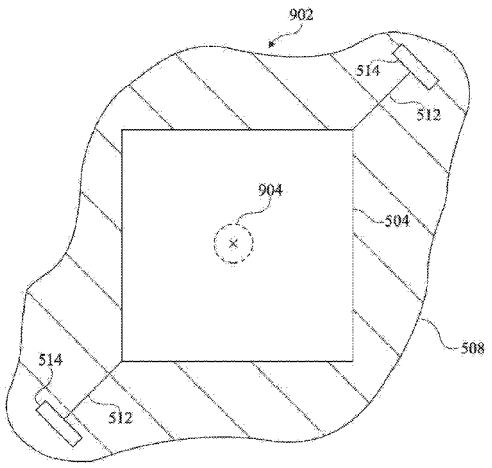
(74) **Mandataire(s) :** CABINET BEAUMONT.

(54) **Dispositif d'horloge.**

(57) Dispositif d'horloge

La présente description concerne un dispositif (902) générateur de signaux d'horloge comportant : un élément résonnant micro-électromécanique (504) ; et au moins un élément de transduction nano-électromécanique (512).

Figure pour l'abrégé : Fig. 9



FR 3 104 861 - A1

Description

Titre de l'invention : *Dispositif d'horloge*

Domaine technique

[0001] La présente description concerne de façon générale les dispositifs électroniques, et, plus particulièrement, les dispositifs générateurs de signaux d'horloge, ou dispositifs d'horloge.

Technique antérieure

[0002] Un dispositif d'horloge est un dispositif électronique permettant généralement de produire un signal périodique de fréquence constante, appelé signal d'horloge. Dans certaines applications, ce signal d'horloge est utilisé comme signal de synchronisation. Dans d'autres applications, par exemple dans le domaine des télécommunications, on tire profit de ce signal d'horloge pour sélectionner des canaux de transmission à des fréquences précises.

[0003] Les dispositifs d'horloge actuels, notamment à base de quartz, sont généralement bien adaptés à la génération de signaux d'horloge de fréquence inférieure au mégahertz. Ces dispositifs sont en revanche peu performants dans des plages de fréquences supérieures au mégahertz, par exemple de l'ordre de la dizaine de mégahertz, voire de la centaine de mégahertz.

Résumé de l'invention

[0004] Il existe un besoin d'améliorer les dispositifs d'horloge actuels.

[0005] Un mode de réalisation pallie tout ou partie des inconvénients des dispositifs d'horloge connus.

[0006] Un mode de réalisation prévoit un dispositif générateur de signaux d'horloge comportant :

un élément résonnant micro-électromécanique ; et

au moins un élément de transduction nano-électromécanique.

[0007] Selon un mode de réalisation, l'élément résonnant, de forme plane, est parallèle à une surface d'un substrat.

[0008] Selon un mode de réalisation, l'élément résonnant possède des modes de vibration en respiration parallèlement à la surface du substrat.

[0009] Selon un mode de réalisation, l'élément résonnant est lié au substrat par l'élément de transduction.

[0010] Selon un mode de réalisation, l'élément résonnant est lié au substrat par au moins une poutre, la poutre étant maintenue, à chaque extrémité, par des ancrages situés en surface du substrat.

[0011] Selon un mode de réalisation, les extrémités de l'élément de transduction sont respec-

tivement liées au substrat et à la poutre, l'élément de transduction étant perpendiculaire à la poutre.

[0012] Selon un mode de réalisation, l'élément résonnant est en outre lié au substrat par un pilier situé, de préférence, à l'aplomb du centre de gravité de l'élément résonnant.

[0013] Selon un mode de réalisation, l'élément résonnant possède, vu de dessus, une forme polygonale, de préférence une forme de parallélogramme, encore plus préférentiellement une forme carrée.

[0014] Selon un mode de réalisation, l'élément résonnant possède une fréquence propre comprise entre 1 MHz et 100 MHz, de préférence comprise entre 10 MHz et 100 MHz, plus préférentiellement égale à environ 20 MHz.

[0015] Selon un mode de réalisation, l'élément résonnant est, vu de dessus, de forme carrée et possède :

un côté compris entre 2 µm et 1 mm, de préférence égal à environ 200 µm ; et

une épaisseur comprise entre 200 nm et 500 µm, de préférence égale à environ 10 µm.

[0016] Selon un mode de réalisation, chaque élément de transduction forme un parallélépipède rectangle possédant :

une longueur comprise entre 500 nm et 100 µm, de préférence égale à environ 5 µm ; et

une largeur comprise entre 50 nm et 50 µm, de préférence égale à environ 250 nm ; et

une hauteur comprise entre 50 nm et 50 µm, de préférence égale à environ 250 nm.

[0017] Selon un mode de réalisation, chaque élément de transduction est une jauge de contrainte piézorésistive.

[0018] Un mode de réalisation prévoit un circuit électronique comprenant au moins un dispositif tel que décrit.

[0019] Un mode de réalisation prévoit un procédé de fabrication d'un dispositif tel que décrit, comprenant une étape consistant à :

réaliser l'élément résonnant micro-électromécanique à partir d'une première couche ; et

réaliser l'élément de transduction nano-électromécanique à partir d'une deuxième couche,

la deuxième couche possédant une épaisseur au moins dix fois inférieure, de préférence environ quarante fois inférieure, à l'épaisseur de la première couche.

Brève description des dessins

[0020] Ces caractéristiques et avantages, ainsi que d'autres, seront exposés en détail dans la description suivante de modes de réalisation particuliers faite à titre non limitatif en relation avec les figures jointes parmi lesquelles :

[0021] [fig.1] la figure 1 représente, de façon schématique et sous forme de blocs, un exemple de circuit électronique du type auquel s'appliquent, à titre d'exemple, les modes de réalisation décrits ;

[0022] [fig.2] la figure 2 est une vue de dessus, schématique et partielle, d'un exemple de dispositif d'horloge ;

[0023] [fig.3] la figure 3 est une vue de dessus, schématique et partielle, illustrant un exemple de fonctionnement du dispositif d'horloge de la figure 2 ;

[0024] [fig.4] la figure 4 est une vue de dessus, schématique et partielle, d'un autre exemple de dispositif d'horloge ;

[0025] [fig.5] la figure 5 est une vue de dessus, schématique et partielle, d'un mode de réalisation d'un dispositif d'horloge ;

[0026] [fig.6] la figure 6 est une vue en coupe, schématique et partielle, du dispositif d'horloge de la figure 5 ;

[0027] [fig.7] la figure 7 est une vue de dessus, schématique et partielle, d'un autre mode de réalisation d'un dispositif d'horloge ;

[0028] [fig.8] la figure 8 est une vue de dessus, schématique et partielle, d'encore un autre mode de réalisation d'un dispositif d'horloge ;

[0029] [fig.9] la figure 9 est une vue de dessus, schématique et partielle, d'encore un autre mode de réalisation d'un dispositif d'horloge ;

[0030] [fig.10] la figure 10 est une vue de dessus, schématique et partielle, symbolisant un mode de vibration d'un élément résonnant ;

[0031] [fig.11] la figure 11 est une vue de dessus, schématique et partielle, symbolisant un autre mode de vibration de l'élément résonnant de la figure 10 ;

[0032] [fig.12] la figure 12 est une vue de dessus, schématique et partielle, symbolisant un mode de vibration d'un autre élément résonnant ;

[0033] [fig.13] la figure 13 est une vue de dessus, schématique et partielle, symbolisant un mode de vibration d'encore un autre élément résonnant ; et

[0034] [fig.14] la figure 14 est une vue de dessus, schématique et partielle, symbolisant un mode de vibration d'encore un autre élément résonnant.

Description des modes de réalisation

[0035] De mêmes éléments ont été désignés par de mêmes références dans les différentes figures. En particulier, les éléments structurels et/ou fonctionnels communs aux différents modes de réalisation peuvent présenter les mêmes références et peuvent disposer de propriétés structurelles, dimensionnelles et matérielles identiques.

[0036] Par souci de clarté, seuls les étapes et éléments utiles à la compréhension des modes de réalisation décrits ont été représentés et sont détaillés. En particulier, l'utilisation qui est faite des signaux générés par les dispositifs d'horloge décrits n'est pas détaillée.

[0037] Sauf précision contraire, lorsque l'on fait référence à deux éléments connectés entre eux, cela signifie directement connectés sans éléments intermédiaires autres que des conducteurs, et lorsque l'on fait référence à deux éléments reliés (en anglais "coupled") entre eux, cela signifie que ces deux éléments peuvent être connectés ou être reliés par l'intermédiaire d'un ou plusieurs autres éléments.

[0038] Dans la description qui suit, lorsque l'on fait référence à des qualificatifs de position absolue, tels que les termes "avant", "arrière", "haut", "bas", "gauche", "droite", etc., ou relative, tels que les termes "dessus", "dessous", "supérieur", "inférieur", etc., ou à des qualificatifs d'orientation, tels que les termes "horizontal", "vertical", etc., il est fait référence, sauf précision contraire, à l'orientation des figures.

[0039] Sauf précision contraire, les expressions "environ", "approximativement", "sensiblement", et "de l'ordre de" signifient à 10 % près, de préférence à 5 % près.

[0040] La figure 1 représente, de façon schématique et sous forme de blocs, un exemple de circuit électronique 102 du type auquel s'appliquent, à titre d'exemple, les modes de réalisation décrits. Le circuit électronique 102 illustré en figure 1 comporte :

une entité de calcul 104 (UC), par exemple une machine d'états, un microprocesseur, un circuit en logique programmable, etc. ;

une mémoire 106 (MEM), par exemple une mémoire constituée d'une ou plusieurs zones de stockage volatil et/ou non volatil permettant de stocker des instructions de code de programme, des variables, des constantes, etc. ;

un dispositif d'horloge 108 (CLK) relié ou connecté à l'entité de calcul 104 et à la mémoire 106 ;

un ou plusieurs bus 110 de données, d'adresses et/ou de commandes entre différents éléments internes au circuit 102 ; et

une interface d'entrée-sortie 112 (I/O) de communication avec l'extérieur du circuit 102.

[0041] Comme cela est représenté en figure 1, le circuit électronique 102 peut en outre inclure divers autres circuits en fonction de l'application. Ces circuits sont, en figure 1, symbolisés par un unique bloc fonctionnel 114 (FCT).

[0042] Le dispositif d'horloge 108 du circuit 102 est typiquement utilisé pour produire un signal d'horloge, ou signal de synchronisation, par exemple un signal périodique de fréquence constante. Ce signal d'horloge, généré par le dispositif 108, permet par exemple de cadencer des échanges de données entre l'entité de calcul 104 et la mémoire 106. Le signal transmis par le dispositif d'horloge 108 peut notamment être utilisé par l'entité de calcul 104 afin d'exécuter des opérations consistant à écrire, lire ou effacer des données dans la mémoire 106.

[0043] La figure 2 est une vue de dessus, schématique et partielle, d'un exemple de dispositif d'horloge 202.

[0044] Dans l'exemple de la figure 2, le dispositif d'horloge 202 comporte une plaque 204, ou plaquette, de forme carrée. Chaque coin, autrement dit chaque angle, de la plaque 204 se termine par une poutre 206 disposée perpendiculairement à la diagonale du carré passant par ce coin. Les extrémités de chaque poutre 206 sont respectivement maintenues solidaires d'un substrat 208 par des ancrages 210. La plaque 204 et les poutres 206 sont, par exemple, réalisées à partir d'une même couche. Dans ce cas, la plaque 204 et les poutres 206 forment conjointement une même pièce mécanique, généralement appelée « masse sismique ».

[0045] En figure 2, une zone hachurée 208 symbolise une portion de surface du substrat. Vue de dessus en figure 2, la plaque 204 est située sur le substrat 208, parallèlement à la surface du substrat 208. La plaque 204 est maintenue, par exemple, à quelques micromètres ou à quelques millimètres au-dessus de la surface du substrat 208, de sorte que la plaque 204 surplombe la surface du substrat 208 sans la toucher.

[0046] Dans l'exemple du dispositif d'horloge 202, la plaque 204 et les poutres 206 ont chacune une épaisseur micrométrique, par exemple égale à environ 50 µm. Le dispositif d'horloge 202 est alors qualifié de microsystème électromécanique (en anglais microelectromechanical system - MEMS). La plaque 204 et les poutres 206 forment, du fait de leurs épaisseurs micrométriques, une structure flexible, capable de se déformer sous l'effet de contraintes extérieures.

[0047] La figure 3 est une vue de dessus, schématique et partielle, illustrant un exemple de fonctionnement du dispositif d'horloge 202 de la figure 2.

[0048] Dans cet exemple de fonctionnement, deux électrodes 302 sont disposées de part et d'autre de la plaque 204, parallèlement à deux côtés opposés de la plaque 204. Les électrodes 302 sont soumises à un signal d'excitation, ou signal d'actionnement, symbolisé, en figure 3, par des flèches 304. Ce signal d'excitation 304 est, par exemple, une tension électrique alternative sinusoïdale. Chaque électrode 302 produit alors un champ électrostatique variable, faisant vibrer la plaque 204. On dit alors que la plaque 204 constitue un élément résonnant, ou résonateur, du dispositif d'horloge 202.

[0049] Sous l'effet du champ électrostatique variable créé par les électrodes 302, des zones de la plaque 204 s'étendent et se rétractent tour à tour, périodiquement, dans un plan parallèle à la surface du substrat 208, tandis que l'épaisseur de la plaque 204 reste sensiblement constante. On dit alors que la plaque 204 vibre en « mode de respiration » (en anglais breathing mode).

[0050] Dans l'exemple de la figure 3, deux autres électrodes 306 sont disposées de part et d'autre de la plaque 204, parallèlement aux deux autres côtés opposés de la plaque 204. Chaque électrode 306 forme, avec la plaque 204, un condensateur dont une armature est constituée par l'électrode 306 considérée, et dont l'autre armature est constituée par la plaque 204. Les électrodes 306, supposées fixes par rapport au substrat 208, sont

alors qualifiées d'électrodes de détection capacitive.

[0051] La distance séparant la plaque 204 de chaque électrode 306, autrement dit la distance séparant les deux armatures de chaque condensateur conjointement formé par une électrode 306 et par la plaque 204, varie périodiquement, au rythme des mouvements d'extension et de rétractation imposés à la plaque 204 par le signal d'excitation 304 appliqué sur les électrodes 302. Cela entraîne une variation périodique de capacité des condensateurs formés par les électrodes 306 et par la plaque 204, permettant ainsi au dispositif 202 de produire un signal d'horloge. La détection de cette variation périodique de capacité est symbolisée, en figure 3, par des flèches 308.

[0052] Dans l'exemple du dispositif 202, les électrodes 302 sont séparées de la plaque 204 par une distance moyenne typiquement comprise entre 1 µm et 10 µm. Cela permet aux électrodes 302 d'excitation de générer leur champ électrostatique au plus près de la plaque 204, sans interférer avec ses mouvements vibratoires. On obtient ainsi une amplitude de vibration maximale.

[0053] Toujours dans l'exemple du dispositif 202, les électrodes 306 sont séparées de la plaque 204 par une distance moyenne typiquement inférieure à 1 µm. Cela permet aux électrodes 306 de détecter une variation de capacité la plus importante possible. Toutefois, la réalisation des électrodes 306 à proximité de la plaque 204 requiert, en pratique, des techniques de photolithographie de haute résolution, qui sont souvent complexes et coûteuses à mettre en œuvre.

[0054] Un des paramètres définissant la performance du dispositif d'horloge 202 est appelé « gigue d'horloge » (en anglais clock jitter). En supposant que le dispositif d'horloge 202 produise en sortie un signal d'horloge de fréquence, notée f0, sensiblement constante, la gigue d'horloge correspond au bruit en fréquence, noté <δf/f0>, pendant une durée de mesure donnée. La gigue d'horloge fixe donc une résolution minimale en fréquence, ou en temps, que le dispositif d'horloge 202 est capable d'atteindre.

[0055] La gigue d'horloge du dispositif 202 dépend généralement de deux types de facteurs prépondérants :

des facteurs dits « déterministes », par exemple des dérives en fréquence causées par des variations de température ; et

des facteurs dits « non déterministes », par exemple dus à un bruit ambiant.

[0056] On cherche donc à réduire au maximum l'influence de ces deux types de facteurs, afin d'obtenir un dispositif d'horloge 202 le plus précis et le plus stable en fréquence possible.

[0057] Les facteurs non déterministes se mesurent typiquement en termes de bruit de phase, noté L(f), où L représente une transformation de Laplace et où f représente une fréquence. Un faible bruit de phase L(f) permet d'abaisser le bruit en fréquence <δf/f0>, donc d'obtenir un dispositif d'horloge 202 de meilleure qualité.

[0058] Le bruit de phase L(f) est inversement proportionnel au rapport signal sur bruit (en anglais Signal-to-Noise Ratio - SNR) du signal d'horloge produit par le dispositif 202. Ce rapport signal sur bruit est difficile à prévoir, car il dépend notamment de propriétés mécaniques du résonateur 204 et de performances électriques d'une boucle d'asservissement (non représentée en figure 3) du dispositif d'horloge 202. Néanmoins, afin d'accroître le rapport signal sur bruit, on cherche généralement à optimiser prioritairement les propriétés du résonateur 204. Cela permet d'avoir à imposer des contraintes moindres sur la boucle d'asservissement du dispositif d'horloge 202.

[0059] Pour un signal d'excitation 304 donné, le niveau du signal de sortie du résonateur 204 dépend principalement de deux paramètres :

le facteur de qualité, noté Q, du résonateur 204, défini par une largeur à mi-hauteur de la réponse en fréquence du résonateur 204, cette largeur à mi-hauteur étant liée à une dissipation d'énergie ; et

l'efficacité de transduction du dispositif d'horloge 202.

[0060] Afin d'obtenir un niveau de signal élevé en sortie du dispositif d'horloge 202, il est donc notamment important d'améliorer le facteur de qualité Q du résonateur 204. Pour cela, on excite généralement la structure conjointement formée par la plaque 204 et les poutres 206 au voisinage de la fréquence de résonance, ou fréquence propre, de cette structure. On obtient ainsi, pour un signal d'excitation 304 donné, des mouvements vibratoires d'amplitude maximale. Dans une structure MEMS telle que celle décrite en relation avec les figures 2 et 3, la fréquence de résonance est typiquement située aux environs d'une dizaine de mégahertz.

[0061] Un inconvénient du dispositif d'horloge 202 tient au fait que la structure conjointement formée par la plaque 204 et les poutres 206 produit généralement des vibrations de faible amplitude, même lorsque cette structure est excitée au voisinage de sa fréquence de résonance. Cela complexifie la détection, par les électrodes 306, des mouvements de la plaque 204, diminuant ainsi le niveau du signal d'horloge en sortie du dispositif 202.

[0062] Un autre inconvénient du dispositif d'horloge 202 tient au fait que les ancrages 210 tendent à rigidifier la structure conjointement formée par la plaque 204 et les poutres 206. Cela entraîne des pertes mécaniques, impactant ainsi de façon négative le facteur de qualité Q du dispositif d'horloge 202.

[0063] La figure 4 est une vue de dessus, schématique et partielle, d'un autre exemple de dispositif d'horloge 402. Le dispositif d'horloge 402 de la figure 4 comporte des éléments communs avec le dispositif d'horloge 202 de la figure 3. Ces éléments communs ne seront pas détaillés à nouveau ci-dessous. À des fins de clarté, le substrat 208 n'a pas été représenté en figure 4.

[0064] Le dispositif d'horloge 402 de la figure 4 diffère du dispositif d'horloge 202 de la figure 3 principalement en ce que, dans le cas du dispositif d'horloge 402, la détection des vibrations de la plaque 204 s'effectue non pas grâce aux électrodes 306, mais par des ancrages piézorésistifs 404 disposés aux quatre coins de la plaque 204. Dans le dispositif d'horloge 402, les électrodes 306 de détection capacitive sont omises, ce qui permet par exemple de placer une électrode 302 d'excitation parallèlement à chaque côté du carré formé par la plaque 204.

[0065] En figure 4, on a représenté différentes zones de vibration de la plaque 204 lorsque le dispositif d'horloge 202 est en fonctionnement. Plus particulièrement :

une zone non hachurée 204L symbolise une région de la plaque 204 soumise à des vibrations de faible amplitude ;

des zones hachurées 204H symbolisent des régions de la plaque 204 soumises à des vibrations de forte amplitude, c'est-à-dire d'amplitude supérieure à celle de la zone 204L ; et

une autre zone hachurée 204M symbolise une région de la plaque 204 soumise à des vibrations d'amplitude moyenne, c'est-à-dire d'amplitude comprise entre celles des zones 204L et 204H.

[0066] Les zones 204L, 204M et 204H illustrent un mode de vibration de la plaque 204. Afin d'optimiser la détection dans ce mode de vibration, les ancrages piézorésistifs 404 du dispositif d'horloge 402 sont liés aux zones hachurées 204H, autrement dit là où les vibrations de la plaque 204 sont les plus intenses.

[0067] Un circuit de lecture 406 connecté à l'un des ancrages 404 du dispositif 402 permet d'extraire, à partir des vibrations de la plaque 204, le signal d'horloge. Dans l'exemple illustré en figure 4, le circuit de lecture 406 comprend :

une résistance 406R connectée entre l'ancrage 404 et un nœud d'application d'un potentiel noté Vd ; et

un condensateur 406C, connecté entre l'ancrage 404 et un autre nœud, parcouru par un courant noté Iout.

[0068] Dans cet exemple, l'ancrage 404 diagonalement opposé à l'ancrage 404 auquel est connecté le circuit de lecture 406 est porté à un potentiel de référence, ici la masse.

[0069] Le dispositif d'horloge 402 est généralement plus performant à haute fréquence et de fabrication plus aisée que le dispositif d'horloge 202. Toutefois, un inconvénient du dispositif d'horloge 402 tient au fait que les ancrages 404 assurent à la fois des fonctions de tenue mécanique et de transduction, ce qui tend à entraver les mouvements vibratoires de la plaque 204. On parle alors de phénomène de rétroaction, car les ancrages piézorésistifs 404 perturbent les vibrations de la plaque 204 qu'ils sont eux-mêmes censés détecter.

[0070] La figure 5 est une vue de dessus, schématique et partielle, d'un mode de réalisation

d'un dispositif d'horloge 502.

[0071] Le dispositif d'horloge 502 comporte un élément résonnant 504 plan et possédant, vu de dessus en figure 5, une forme de préférence carrée. Chaque coin, autrement dit chaque angle, de l'élément résonnant 504 se termine par une poutre 506 disposée perpendiculairement à la diagonale du carré passant par ce coin. Les extrémités de chaque poutre 506 sont respectivement liées à un substrat 508 par des ancrages 510 perpendiculaires à l'axe des poutres 506. L'élément résonnant 504 et les poutres 506 sont, par exemple, réalisés à partir d'une même couche. Dans ce cas, l'élément résonnant 504 et les poutres 506 forment conjointement une même pièce mécanique.

[0072] En figure 5, une zone hachurée 508 symbolise une portion de surface du substrat 508. Vu de dessus en figure 5, l'élément résonnant 504 est situé sur le substrat 508, parallèlement à la surface du substrat 508. L'élément résonnant 504 est maintenu, par exemple, à quelques micromètres ou à quelques millimètres au-dessus de la surface du substrat 508, de sorte que l'élément résonnant 504 surplombe la surface du substrat 508 sans la toucher.

[0073] Dans le dispositif d'horloge 502, l'élément résonnant 504 et les poutres 506 ont une épaisseur comprise entre 200 nm et 500 µm, de préférence égale à environ 10 µm. L'élément résonnant, de forme carrée, possède un côté compris entre 2 µm et 1 mm, de préférence égal à environ 200 µm. Les poutres 506 présentent, vues de dessus en figure 5, une largeur comprise entre 1 µm et 5 µm, de préférence égale à environ 3 µm, et une longueur comprise entre 10 µm et 70 µm, de préférence égale à environ 40 µm. Du fait de leur épaisseur micrométrique, l'élément résonnant 504 et les poutres 506 du dispositif d'horloge 502 forment conjointement un microsystème électromécanique, ou MEMS. En particulier, l'élément résonnant 504 est qualifié d'élément résonnant micro-électromécanique.

[0074] Selon un mode de réalisation, l'élément résonnant 504 et les poutres 506 possèdent la même épaisseur. En variante, les poutres 506 possèdent une épaisseur inférieure à celle de l'élément résonnant 504.

[0075] Selon un mode de réalisation, un élément de transduction 512, de préférence un élément de transduction piézorésistif, est lié à chaque poutre 506. Comme illustré en figure 5, les éléments de transduction 512 sont disposés perpendiculairement aux poutres 506, dans le prolongement des diagonales du carré formé par l'élément résonnant 504. Chaque élément de transduction est, en outre, lié au substrat 508 par un ancrage 514. Dans la suite de la description, les éléments de transduction piézorésistifs 512 sont également appelés jauges piézorésistives ou jauges de contrainte.

[0076] Selon un mode de réalisation préféré, les éléments de transduction 512 forment chacun un parallélépipède rectangle possédant une longueur comprise entre 500 nm et 100 µm, de préférence égale à environ 5 µm, une largeur comprise entre 50 nm et

50 µm, de préférence égale à environ 250 nm, et une hauteur, ou épaisseur, comprise entre 50 nm et 50 µm, de préférence égale à environ 250 nm. Par longueur de l'élément de transduction 512, on entend la dimension de l'élément 512 entre l'ancrage 514 et la poutre 506 et par hauteur ou épaisseur de l'élément de transduction 512, on entend la dimension de l'élément 512 perpendiculaire à la surface du substrat 508.

[0077] Les éléments de transduction 512 possèdent préférentiellement des dimensions identiques, aux dispersions de fabrication près. Du fait de leurs largeurs et hauteurs nanométriques, les éléments de transduction 512 du dispositif d'horloge 502 sont qualifiés de nanosystèmes électromécaniques (en anglais nanoelectromechanical system - NEMS), ou éléments de transduction nano-électromécaniques.

[0078] Afin de produire un signal d'horloge, on fait vibrer l'élément résonnant 504 dans un plan parallèle à la surface du substrat 508, autrement dit en « mode de respiration » comme exposé précédemment. De manière générale, la vibration de l'élément résonnant 504 est obtenue grâce à un signal électrique d'excitation (en courant ou en tension). Ce signal est modulé de manière à exciter l'élément résonnant 504 à une fréquence environ égale à sa fréquence de résonance. L'élément résonnant 504 possède par exemple une fréquence propre comprise entre 1 MHz et 100 MHz, de préférence comprise entre 10 MHz et 100 MHz, plus préférentiellement égale à environ 20 MHz.

[0079] Selon un mode de réalisation, la vibration est causée par l'application d'un champ électrostatique variable rayonné par une ou plusieurs électrodes positionnées à proximité de l'élément résonnant 504. Selon un autre mode de réalisation, la vibration est produite par une couche de matériau piézoélectrique située sous l'élément résonnant 504. En variante, l'élément résonnant 504 est constitué d'un matériau piézoélectrique capable de s'étendre et de se rétracter au gré des variations d'un signal de commande. Selon encore un autre mode de réalisation, les poutres 506 sont constituées d'un matériau piézoélectrique, de sorte qu'un potentiel appliqué sur les poutres 506 produit une contrainte sur les poutres 506 et sur l'élément résonnant 504.

[0080] En variante, les poutres 506 sont en un matériau conducteur électriquement qui se dilate lorsque la température augmente, les poutres 506 étant disposées de sorte à appliquer une contrainte sur l'élément résonnant 504. Un courant électrique traversant les poutres 506 aura alors tendance à provoquer une élévation de température, donc une dilatation, des poutres 506. Au contraire, une absence de courant électrique traversant les poutres 506 aura alors tendance à provoquer une baisse de température, donc une compression, des poutres 506. En alternant périodiquement entre des phases où un courant électrique traverse les poutres 506 et d'autres phases où les poutres 506 sont traversées par un courant négligeable ou nul, on peut parvenir à faire vibrer l'élément résonnant 504 au voisinage de sa fréquence de résonance.

[0081] Un avantage du dispositif d'horloge 502 tient au fait que les jauges piézorésistives

512 permettent d'atteindre des performances de transduction élevées, supérieures notamment aux performances des systèmes de transduction capacitifs et piézorésistifs respectivement exposés en relation avec les figures 3 et 4. Le dispositif d'horloge 502 est en outre plus facile à fabriquer que les dispositifs à détection capacitive qui, à l'instar du dispositif 202 de la figure 3, possèdent des électrodes 306 très proches de la plaque 204.

[0082] Un autre avantage du dispositif 502 réside dans le fait que les jauges piézorésistives NEMS 512 ont des dimensions significativement inférieures à celles de la structure MEMS conjointement formée par l'élément résonnant 504 et par les poutres 506. Cela permet en particulier de faire en sorte que les jauges piézorésistives NEMS 512 aient une influence négligeable sur les vibrations de l'élément résonnant 504, c'est-à-dire que les jauges 512 n'induisent pas de phénomène de rétroaction.

[0083] Dans le cas du dispositif d'horloge 502, les fonctions de maintien mécanique, ou d'ancrage, et de transduction sont en effet découplées, contrairement, par exemple, au cas du dispositif d'horloge 402 de la figure 4. Cela permet notamment d'optimiser les performances mécaniques de l'élément résonnant 504 en réduisant les pertes liées aux ancrages 510, donc d'améliorer le facteur de qualité Q du dispositif d'horloge 502.

[0084] De manière plus générale, l'association d'un élément résonnant 504 de type MEMS et d'éléments de transduction 512 de type NEMS permet au dispositif d'horloge 502 d'atteindre de meilleures performances à la fois en termes de transduction et en termes de facteur de qualité Q. On obtient ainsi, grâce au dispositif d'horloge 502, un signal d'horloge de meilleure qualité que le signal d'horloge susceptible d'être produit, par exemple, par les dispositifs d'horloge 202 (figures 2 et 3) et 402 (figure 4).

[0085] On a représenté en figure 5 un dispositif d'horloge 502 comportant un élément résonnant MEMS 504 de forme carrée, lié au substrat 508 par quatre jauges piézorésistives NEMS 512. En variante, le dispositif d'horloge 502 comporte un élément résonnant MEMS 504 de forme quelconque, notamment une forme polygonale, de préférence une forme de parallélogramme. En outre, le dispositif d'horloge 502 peut comporter un nombre quelconque de jauges piézorésistives NEMS 512, ces jauges 512 étant, de préférence, positionnées de sorte à détecter une amplitude de vibration maximale de l'élément résonnant MEMS 504.

[0086] La figure 6 est une vue en coupe selon le plan AA, schématique et partielle, du dispositif d'horloge 502 de la figure 5.

[0087] Comme illustré dans la vue en coupe de la figure 6, la jauge piézorésistive 512 (NEMS) est intercalée entre d'une part une structure (MEMS) conjointement formée par l'élément résonnant 504 et la poutre 506, et d'autre part l'ancrage 514. La jauge piézorésistive NEMS 512 possède une épaisseur, notée T_NEMS, au moins dix fois inférieure, de préférence environ quarante fois inférieure, à l'épaisseur, notée T_MEMS,

de la structure MEMS et de l'ancrage 514. La jauge piézorésistive NEMS 512 détecte ainsi avec une grande sensibilité les mouvements vibratoires de la structure MEMS et ne perturbe pas, ou perturbe peu, ces mouvements vibratoires.

[0088] La figure 7 est une vue de dessus, schématique et partielle, d'un autre mode de réalisation d'un dispositif d'horloge 702.

[0089] Le dispositif d'horloge 702 de la figure 7 comprend des éléments communs avec le dispositif 502 de la figure 5. Ces éléments communs ne seront pas détaillés à nouveau ci-après. Le dispositif 702 de la figure 7 diffère du dispositif 502 de la figure 5 principalement en ce que le dispositif 702 possède, à chaque coin de l'élément résonnant 504, deux jauges piézorésistives 512a et 512b.

[0090] En figure 7, seul un coin de l'élément résonnant 504 du dispositif d'horloge 702 a été représenté, étant entendu que les autres coins de l'élément résonnant 504 peuvent être identiques, aux dispersions de fabrication près, au coin représenté en figure 7.

[0091] Selon un mode de réalisation, les jauges piézorésistives 512a et 512b sont excentrées par rapport à la poutre 506. Cela permet de réduire encore davantage l'influence des jauges piézorésistives 512a et 512b sur les mouvements vibratoires de l'élément résonnant 504 et d'éviter ou de limiter l'apparition de modes communs. Les jauges piézorésistives 512a et 512b sont respectivement situées face à face, de part et d'autre de la poutre 506. Chaque jauge piézorésistive 512a, 512b est disposée perpendiculairement à la direction longitudinale de la poutre 506 et est liée au substrat 508 (non représenté en figure 7) par un ancrage 514a, 514b. La poutre 506 est toujours supposée liée au substrat 508, c'est-à-dire maintenue solidaire du substrat 508, par les ancrages 510 situés à chacune de ses extrémités.

[0092] Dans l'orientation de la figure 7, lorsque l'élément résonnant 504 s'étend vers le haut (flèche 702T), cela provoque une compression de la jauge piézorésistive 512a et une extension de la jauge piézorésistive 512b. À l'inverse, lorsque l'élément résonnant 504 se rétracte vers le bas (flèche 702B), cela provoque une extension de la jauge piézorésistive 512a et une compression de la jauge piézorésistive 512b. Dans cette configuration, appelée mesure différentielle, les jauges piézorésistives 512a et 512b subissent des contraintes d'amplitude sensiblement égale et de signe opposé.

[0093] Comme illustré en figure 7, en fonctionnement, une source de tension 704a (V) applique, sur l'ancrage 514a, un potentiel électrique continu, de valeur positive notée +Vb. De façon analogue, une source de tension 704b (V) applique, sur l'ancrage 514b, un potentiel électrique continu, de valeur négative notée -Vb. Une résistance 706 (RL) est connectée entre l'un des ancrages 510 de la poutre 506 (l'ancrage 510 le plus proche des jauges piézorésistives 512a et 512b, en figure 7) et la masse. La valeur de la résistance RL est supposée très supérieure, par exemple mille fois supérieure, à la résistance des jauges piézorésistives 512a et 512b, notée RG.

[0094] Dans cette configuration, on applique à chaque jauge piézorésistive 512a, 512b une tension d'amplitude Vb égale, mais de signe opposé. On obtient ainsi, sur l'ancrage 510 relié à la résistance 706, un potentiel variable noté Vout, de valeur moyenne approximativement nulle, par exemple comprise entre -0,1 V et +0,1 V, de préférence nulle, et dont l'amplitude est proportionnelle à l'amplitude de vibration de l'élément résonnant 504.

[0095] En variante, la tension Vb est une tension électrique alternative de fréquence notée fb, la fréquence fb étant proche de la fréquence f0 de vibration de l'élément résonnant 504. Dans cette variante, la tension de sortie Vout possède une composante de fréquence égale à f0 – fb. Cela permet avantageusement d'utiliser des circuits de lecture fonctionnant à basse fréquence.

[0096] Selon un mode de réalisation, l'élément résonnant MEMS 504 est constitué de silicium. Les jauges piézorésistives NEMS 512a et 512b du dispositif d'horloge 702 sont, de préférence, constituées du même matériau que l'élément résonnant MEMS 504. En variante, les jauges piézorésistives NEMS 512a et 512b sont constituées d'un matériau piézorésistif autre que celui dont est constitué l'élément résonnant MEMS 504.

[0097] La figure 8 est une vue de dessus, schématique et partielle, d'encore un autre mode de réalisation d'un dispositif d'horloge 802.

[0098] Le dispositif d'horloge 802 de la figure 8 comprend des éléments communs avec le dispositif 502 de la figure 5. Ces éléments communs ne seront pas détaillés à nouveau ci-après. Le dispositif 802 de la figure 8 diffère du dispositif 502 de la figure 5 principalement en ce que, dans le dispositif 802, les poutres 506 sont omises. Chaque coin de l'élément résonnant 504 du dispositif d'horloge 802 est ainsi lié au substrat 508 (non représenté en figure 8) par une jauge piézorésistive 512 de résistance RG. Comme dans le dispositif 502 de la figure 5, chaque jauge piézorésistive 512 du dispositif 802 est maintenue solidaire du substrat 508 par un ancrage 514.

[0099] Selon un mode de réalisation, l'élément résonnant 504 est lié au substrat 508 par un pilier central (non représenté en figure 8). Cela permet avantageusement de découpler la fonction d'ancrage mécanique, réalisée par le pilier central, et la fonction de transduction, assurée par les jauges piézorésistives 512. Autrement dit, dans ce cas, les jauges 512 ne participent pas, ou participent peu, à la fonction d'ancrage mécanique.

[0100] Dans le dispositif d'horloge 802, une source de tension 804 (V) impose sur l'un des ancrages 514 une tension positive, notée +Vb. Un autre ancrage 514 du dispositif 802 est relié à la masse par l'intermédiaire d'une résistance 806 de valeur RL. La valeur RL de la résistance 806 est choisie de manière à être égale à environ deux fois la résistance RG d'une jauge piézorésistive 512 (RL = 2.RG). Une tension de sortie Vout est mesurée aux bornes de la résistance 806.

[0101] Les deux jauges 512 respectivement reliées à la source de tension 804 et à la résistance 806 sont alors dites branchées en configuration de « demi-pont de Wheatstone », la résistance 806 faisant ici office de deuxième résistance du pont. Lorsque l'élément résonnant 504 entre en vibration, la tension de sortie Vout du demi-pont de Wheatstone aura une composante oscillante d'amplitude proportionnelle à la vibration mécanique de l'élément résonnant 504.

[0102] Comme exposé en relation avec la figure 7, la tension Vb peut être une tension continue ou une tension alternative.

[0103] La transduction du mouvement vibratoire de l'élément résonnant 504 du dispositif d'horloge 802 s'effectue grâce aux jauges piézorésistives 512. Sous l'action des vibrations de l'élément résonnant 504, toutes les jauges piézorésistives 512 subissent alternativement des contraintes en tension et en compression sensiblement identiques. Ces contraintes provoquent des variations périodiques de résistance RG des jauges piézorésistives 512, qui permettent de produire un signal d'horloge.

[0104] Les jauges piézorésistives 512 du dispositif d'horloge 802 remplissent à la fois une fonction de transduction et une fonction de maintien mécanique. Toutefois, contrairement au dispositif d'horloge 402 de la figure 4, on fait ici en sorte que l'ensemble des jauges piézorésistives 512 possède une rigidité en compression négligeable, c'est-à-dire au moins dix fois inférieure à la rigidité du mode de vibration de l'élément résonnant 504. On s'affranchit ainsi des problèmes de rétroaction précédemment décrits en relation avec la figure 4.

[0105] Dans le dispositif d'horloge 802, l'élément résonnant 504 possède par exemple un mode de vibration à une fréquence f0 égale à environ 20 MHz, avec une raideur égale à environ $3{,}6.10^{7}$ $N.m^{-1}$. Les quatre jauges piézorésistives 512 possèdent ensemble une raideur en compression par exemple égale à environ 5.10^{3} $N.m^{-1}$, autrement dit une rigidité plusieurs milliers de fois inférieure à celle du mode de vibration de l'élément résonnant 504. Plus généralement, la rigidité de l'élément résonnant 504 est au moins mille fois supérieure à celle d'une jauge piézorésistive 512.

[0106] La figure 9 est une vue de dessus, schématique et partielle, d'encore un autre mode de réalisation d'un dispositif d'horloge 902.

[0107] Le dispositif d'horloge 902 de la figure 9 comprend des éléments communs avec le dispositif 802 de la figure 8. Ces éléments communs ne seront pas détaillés à nouveau ci-après. Le dispositif 902 de la figure 9 diffère du dispositif 802 de la figure 8 principalement en ce que le dispositif 902 est lié au substrat 508 par seulement deux jauges piézorésistives 512 diagonalement opposées.

[0108] Selon un mode de réalisation, l'élément résonnant 504 est en outre lié au substrat 508 par un pilier 904 représenté, en figure 9, par un cercle en pointillé. Le pilier 904 est, de préférence, un pilier central cylindrique, situé à l'aplomb du centre de gravité de

l'élément résonnant 504.

[0109] Le pilier 904 est avantageusement lié à une zone où l'élément résonnant 504 subit une déformation minimale dans le mode de vibration considéré. Cela permet notamment de faire en sorte que le pilier 904 ait un impact négligeable sur le mode de vibration de l'élément résonnant 504, autrement dit que le pilier 904 n'entrave pratiquement pas les mouvements vibratoires de l'élément résonnant 504. On limite ainsi les pertes dues à la liaison de l'élément résonnant 504 au substrat 508, tout en améliorant la solidité mécanique du dispositif d'horloge 902.

[0110] On a représenté en figure 9 un dispositif d'horloge 902 comportant un élément résonnant MEMS 504 de forme carrée, lié au substrat 508 par deux jauges piézorésistives NEMS 512. En variante, le dispositif d'horloge 902 comporte un élément résonnant MEMS 504 de forme quelconque, notamment une forme polygonale, de préférence une forme de parallélogramme. En outre, le dispositif d'horloge 902 peut comporter un nombre quelconque de jauges piézorésistives NEMS 512, ces jauges 512 étant, de préférence, positionnées de sorte à détecter une amplitude de vibration maximale de l'élément résonnant MEMS 504.

[0111] Les dispositifs d'horloge 502, 702, 802 et 902 respectivement décrits en relation avec les figures 5, 7, 8 et 9 sont, de préférence, réalisés en mettant en œuvre un procédé tel que celui décrit dans la demande de brevet n° WO2011048132, qui est incorporée par référence dans la mesure où cela est autorisé par la loi. Un mode de mise en œuvre de ce procédé comprend en particulier une étape où l'élément résonnant 504 et les poutres 506 sont de préférence obtenus à partir d'une première couche d'épaisseur micrométrique tandis que les jauges piézorésistives 512 sont obtenues à partir d'une deuxième couche d'épaisseur nanométrique, c'est-à-dire d'épaisseur au moins dix fois inférieure, de préférence environ quarante fois inférieure, à celle de la première couche.

[0112] L'utilisation, dans le circuit 102 de la figure 1, d'un dispositif d'horloge 108 analogue aux dispositifs d'horloge 502, 702, 802 et 902 permet avantageusement de produire un signal d'horloge de haute qualité à une fréquence par exemple égale à environ 20 MHz.

[0113] Les figures 10 à 14 illustrent, en vue de dessus, des modes de réalisation d'éléments résonnants 504 de diverses formes et symbolisent des modes de vibration associés. Les figures 10 à 14 comprennent un repère orthonormé (O,x,y,z) dont l'axe z est perpendiculaire à la surface du substrat 508 (non représenté), les figures 10 à 14 représentant toutes des vues situées dans un plan (O,x,y) perpendiculaire à l'axe z.

[0114] Dans les figures 10 à 14, l'élément résonnant s'étend et se rétracte dans le plan (O,x,y) parallèle au substrat 508 (non représenté). L'élément résonnant 504 ne subit en revanche aucune transformation selon l'axe z, ou une transformation selon l'axe z

d'amplitude négligeable par rapport aux transformations subies selon les axes x et y.

[0115] La figure 10 est une vue de dessus, schématique et partielle, symbolisant un mode de vibration 504_M1 d'un élément résonnant 504 de forme carrée, par exemple l'élément résonnant 504 du dispositif d'horloge 902 de la figure 9. L'élément résonnant 504 est supposé lié au substrat 508 (non représenté) par le pilier 904.

[0116] Au cours de chaque période du mode de vibration 504_M1 symbolisé en figure 10, l'élément résonnant 504 s'étend selon les axes x et y, puis se rétracte selon les axes x et y.

[0117] La figure 11 est une vue de dessus, schématique et partielle, symbolisant un autre mode de vibration 504_M2 de l'élément résonnant 504 de la figure 10.

[0118] Au cours de chaque période du mode de vibration 504_M2, l'élément résonnant 504 s'étend selon l'axe x tandis qu'il se rétracte selon l'axe y, puis se rétracte selon l'axe x tandis qu'il s'étend selon l'axe y.

[0119] De manière générale, lorsque l'on souhaite tirer profit de l'élément résonnant 504 pour produire un signal d'horloge, on place avantageusement le ou les éléments de transduction nano-électromécaniques 512 là où l'amplitude de vibration est maximale pour un mode de vibration donné. Pour exploiter au mieux le mode de vibration 504_M1 symbolisé en figure 10, on a par exemple intérêt à placer un élément de transduction 512 à chaque coin de l'élément résonnant 504, dans le prolongement des diagonales du carré formé par l'élément 504. En revanche, pour tirer profit du mode de vibration 504_M2 symbolisé en figure 11, on aura par exemple plutôt intérêt à prévoir des éléments de transduction 512 perpendiculaires aux côtés parallèles à l'axe y du carré formé par l'élément 504.

[0120] La figure 12 est une vue de dessus, schématique et partielle, symbolisant le mode de vibration 504_M1 dans un mode de réalisation où l'élément résonnant 504 est de forme circulaire.

[0121] Au cours de chaque période du mode de vibration 504_M1 symbolisé en figure 12, le diamètre du disque formé par la surface supérieure de l'élément résonnant 504 augmente puis diminue.

[0122] La figure 13 est une vue de dessus, schématique et partielle, symbolisant le mode de vibration 504_M1 dans un mode de réalisation où l'élément résonnant 504 est en forme de couronne. Selon ce mode de réalisation, le pilier 904 liant l'élément résonnant 504 au substrat 508 (non représenté) est en forme de cylindre creux.

[0123] Au cours de chaque période du mode de vibration 504_M1 symbolisé en figure 13, le diamètre extérieur de la couronne formée par la surface supérieure de l'élément résonnant 504 augmente puis diminue.

[0124] La figure 14 est une vue de dessus, schématique et partielle, symbolisant le mode de vibration 504_M1 dans un mode de réalisation où l'élément résonnant 504 est de

forme rectangulaire. Selon ce mode de réalisation, le pilier 904 liant l'élément résonnant 504 au substrat 508 (non représenté) est omis. Dans ce cas, l'élément résonnant 504 est lié au substrat 508 par un ancrage 514 situé à l'une des extrémités, ou l'un des petits côtés, de l'élément 504.

[0125] Au cours de chaque période du mode de vibration 504_M1 symbolisé en figure 14, l'élément résonnant 504 s'étend puis se rétracte principalement selon sa direction longitudinale y.

[0126] Pour exploiter au mieux le mode de vibration 504_M1 symbolisé en figure 14, on a par exemple intérêt à placer un élément de transduction perpendiculairement à l'extrémité de l'élément résonnant 504 qui n'est pas liée au substrat 508 par l'ancrage 514 (l'extrémité supérieure de l'élément résonnant 504, dans l'orientation de la figure 14).

[0127] Les modes de réalisation décrits ci-dessus en relation avec les figures 10 à 14 ne sont pas limitatifs. En particulier, la personne du métier est capable de transposer ces modes de réalisation à des configurations dans lesquelles les éléments résonnants 504 sont de forme quelconque et/ou dont les modes de vibration peuvent être différents de ceux décrits précédemment.

[0128] Divers modes de réalisation et variantes ont été décrits. La personne du métier comprendra que certaines caractéristiques de ces divers modes de réalisation et variantes pourraient être combinées, et d'autres variantes apparaîtront à la personne du métier. En particulier, la personne du métier est capable d'ajuster la géométrie de l'élément résonnant micro-électromécanique 504 en fonction de la fréquence f0 à atteindre. La personne du métier est en outre capable de positionner le ou les éléments de transduction nano-électromécaniques 512 afin d'optimiser la qualité du signal d'horloge produit.

[0129] Enfin, la mise en œuvre pratique des modes de réalisation et variantes décrits est à la portée de la personne du métier à partir des indications fonctionnelles données ci-dessus.

Revendications

[Revendication 1] Dispositif (502 ; 702 ; 802 ; 902) générateur de signaux d'horloge comportant :
un élément résonnant micro-électromécanique (504) ; et
au moins un élément de transduction nano-électromécanique (512 ; 512a, 512b).

[Revendication 2] Dispositif selon la revendication 1, dans lequel l'élément résonnant (504), de forme plane, est parallèle à une surface d'un substrat (508).

[Revendication 3] Dispositif selon la revendication 2, dans lequel l'élément résonnant (504) possède des modes de vibration en respiration parallèlement à la surface du substrat (508).

[Revendication 4] Dispositif selon la revendication 2 ou 3, dans lequel l'élément résonnant (504) est lié au substrat (508) par l'élément de transduction (512 ; 512a, 512b).

[Revendication 5] Dispositif selon la revendication 2 ou 3, dans lequel l'élément résonnant (504) est lié au substrat (508) par au moins une poutre (506), la poutre étant maintenue, à chaque extrémité, par des ancrages (510) situés en surface du substrat (508).

[Revendication 6] Dispositif selon la revendication 5, dans lequel les extrémités de l'élément de transduction (512 ; 512a, 512b) sont respectivement liées au substrat (508) et à la poutre (506), l'élément de transduction étant perpendiculaire à la poutre.

[Revendication 7] Dispositif selon l'une quelconque des revendications 2 à 6, dans lequel l'élément résonnant (504) est en outre lié au substrat (508) par un pilier (904) situé, de préférence, à l'aplomb du centre de gravité de l'élément résonnant.

[Revendication 8] Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel l'élément résonnant (504) possède, vu de dessus, une forme polygonale, de préférence une forme de parallélogramme, encore plus préférentiellement une forme carrée.

[Revendication 9] Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel l'élément résonnant (504) possède une fréquence propre comprise entre 1 MHz et 100 MHz, de préférence comprise entre 10 MHz et 100 MHz, plus préférentiellement égale à environ 20 MHz.

[Revendication 10] Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans lequel l'élément résonnant (504) est, vu de dessus, de forme carrée et possède :
un côté compris entre 2 µm et 1 mm, de préférence égal à environ

200 µm ; et
une épaisseur (T_MEMS) comprise entre 200 nm et 500 µm, de préférence égale à environ 10 µm.

[Revendication 11] Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans lequel chaque élément de transduction (512 ; 512a, 512b) forme un parallélépipède rectangle possédant :
une longueur comprise entre 500 nm et 100 µm, de préférence égale à environ 5 µm ; et
une largeur comprise entre 50 nm et 50 µm, de préférence égale à environ 250 nm ; et
une hauteur (T_NEMS) comprise entre 50 nm et 50 µm, de préférence égale à environ 250 nm.

[Revendication 12] Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, dans lequel chaque élément de transduction (512 ; 512a, 512b) est une jauge de contrainte piézorésistive.

[Revendication 13] Circuit électronique (102) comprenant au moins un dispositif (502 ; 702 ; 802 ; 902) selon l'une quelconque des revendications 1 à 12.

[Revendication 14] Procédé de fabrication d'un dispositif (502 ; 702 ; 802 ; 902) selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, comprenant une étape consistant à :
réaliser l'élément résonnant micro-électromécanique (504) à partir d'une première couche ; et
réaliser l'élément de transduction nano-électromécanique (512 ; 512a, 512b) à partir d'une deuxième couche,
la deuxième couche possédant une épaisseur au moins dix fois inférieure, de préférence environ quarante fois inférieure, à l'épaisseur de la première couche.

[Fig. 1]

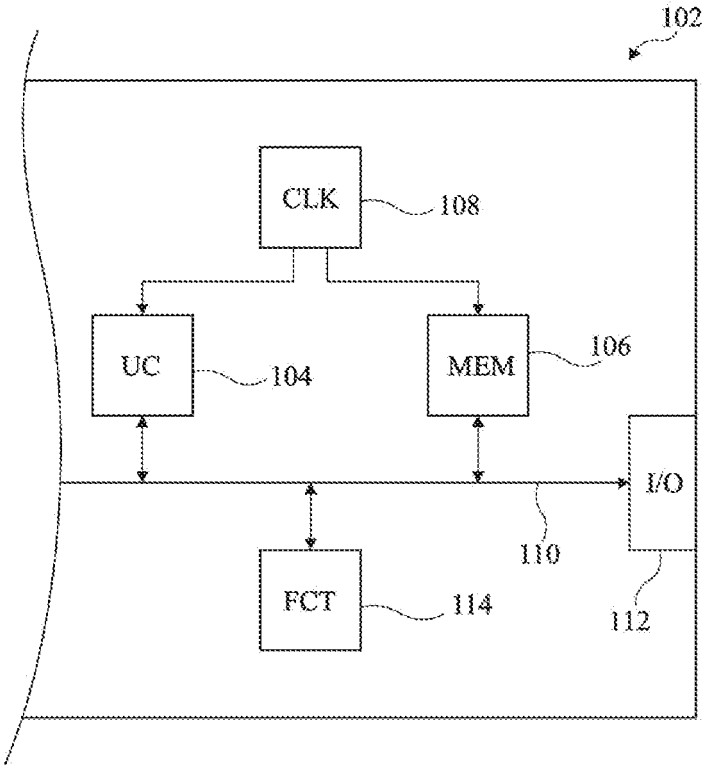


Fig 1

[Fig. 2]

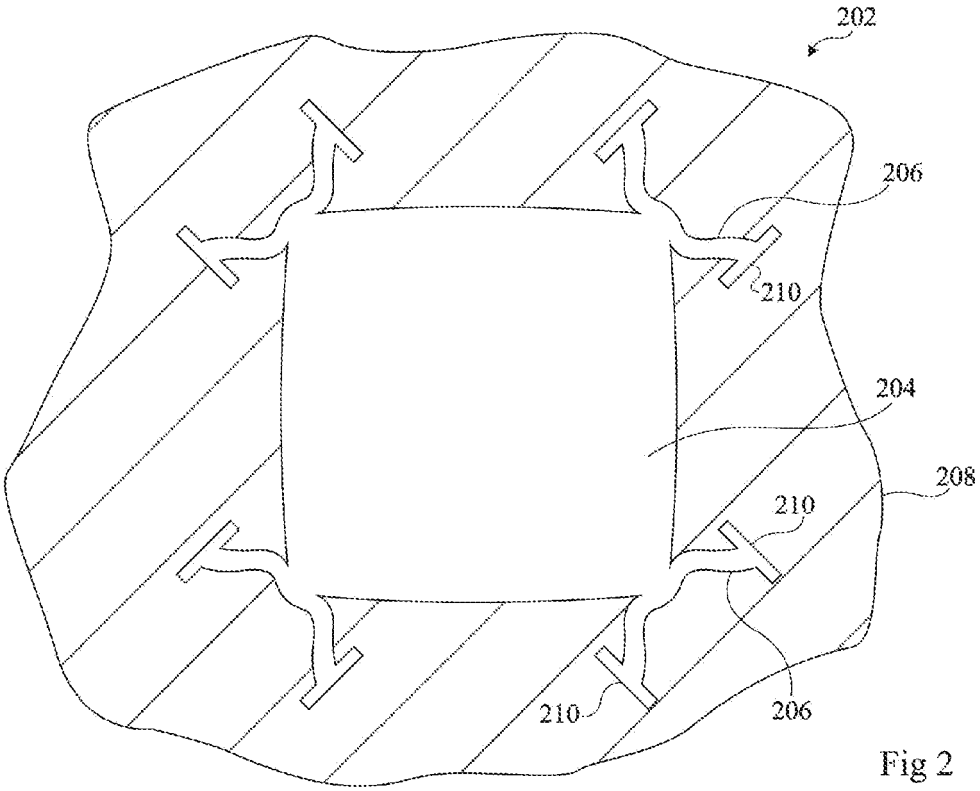


Fig 2

[Fig. 3]

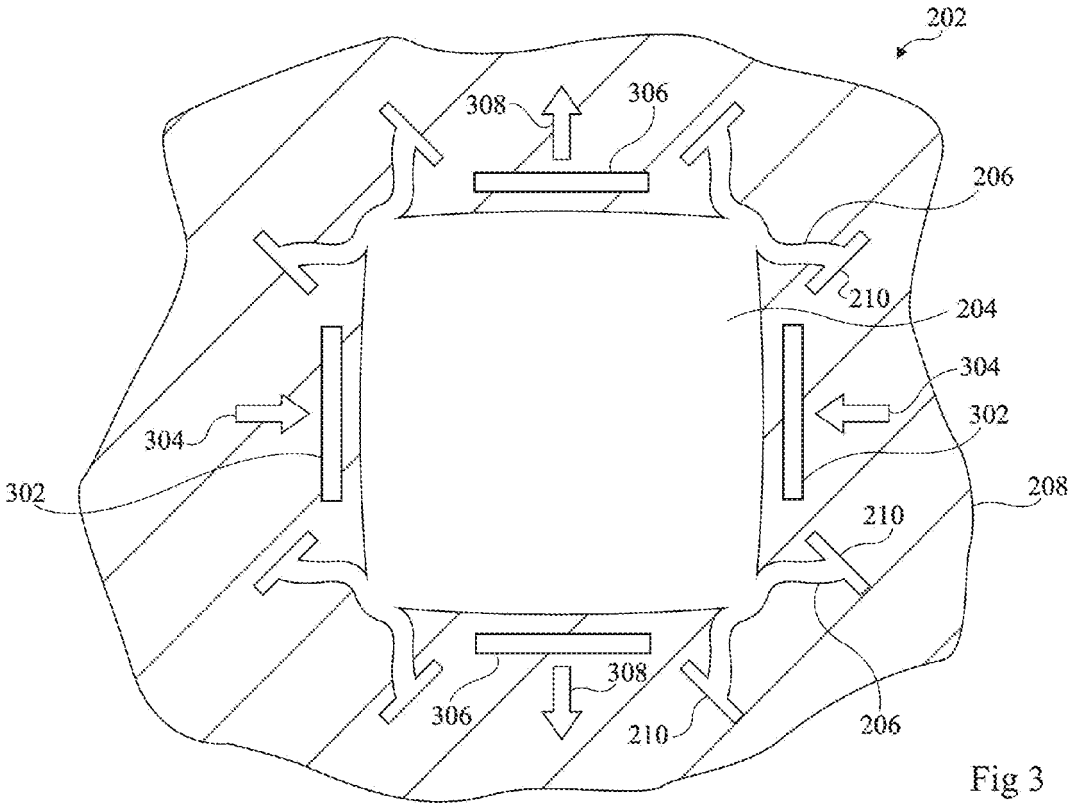


Fig 3

[Fig. 4]

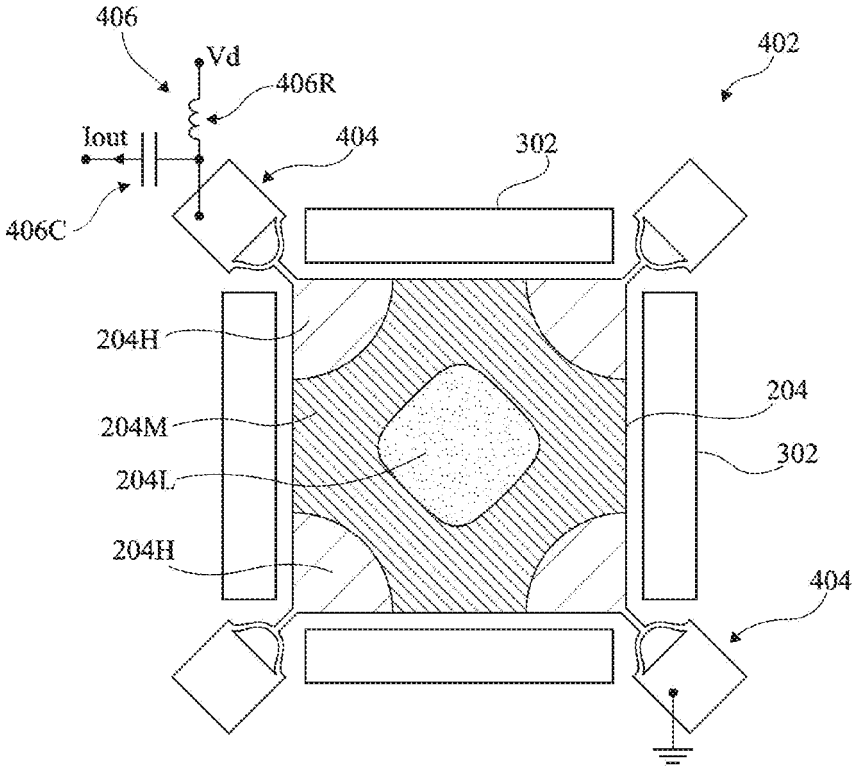


Fig 4

[Fig. 5]

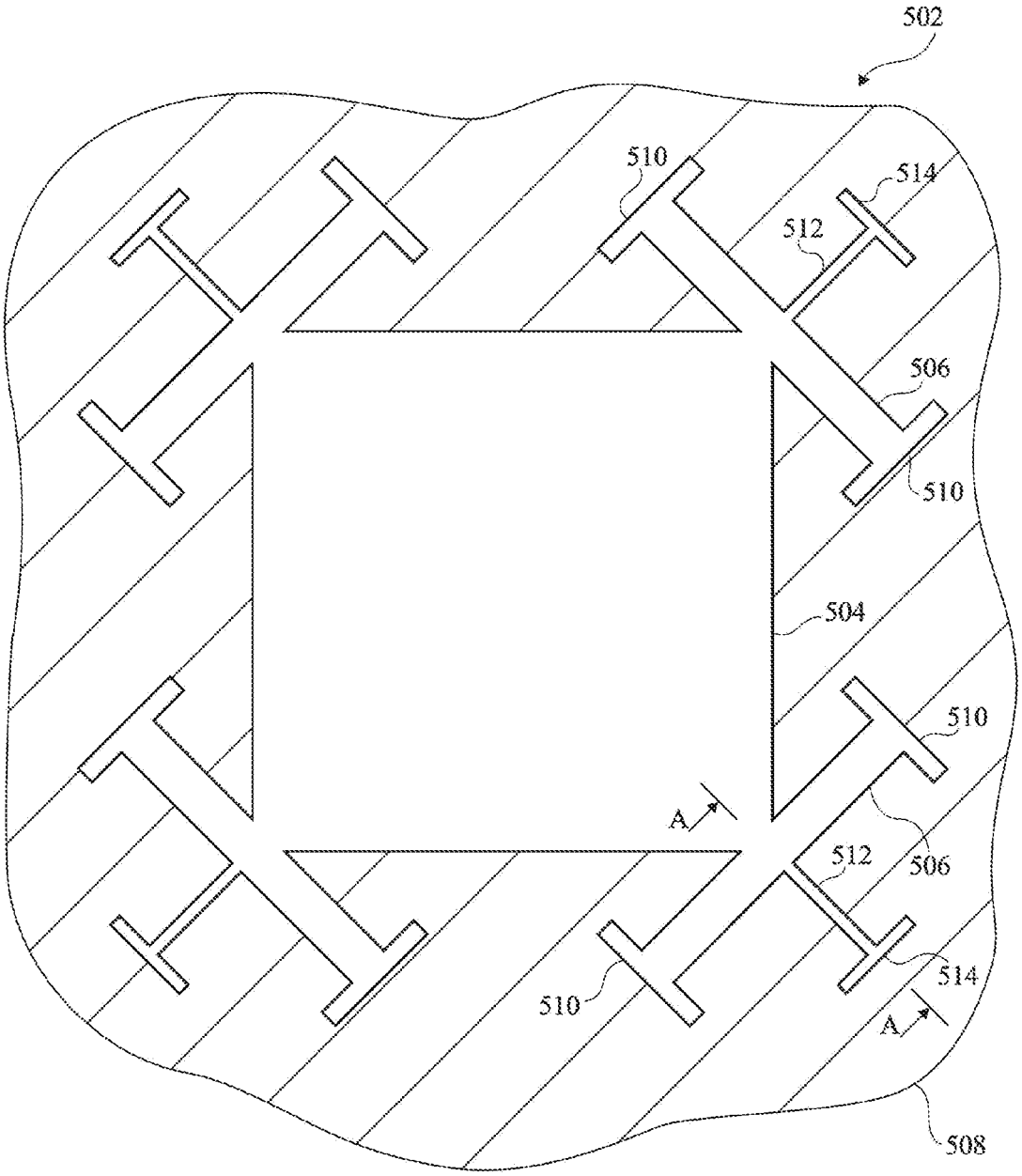


Fig 5

[Fig. 6]

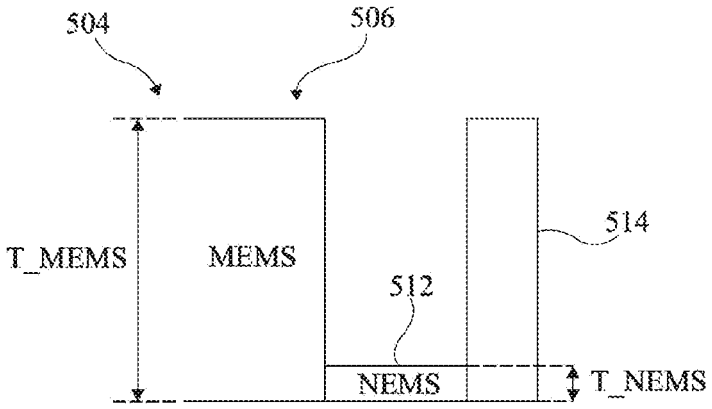


Fig 6

[Fig. 7]

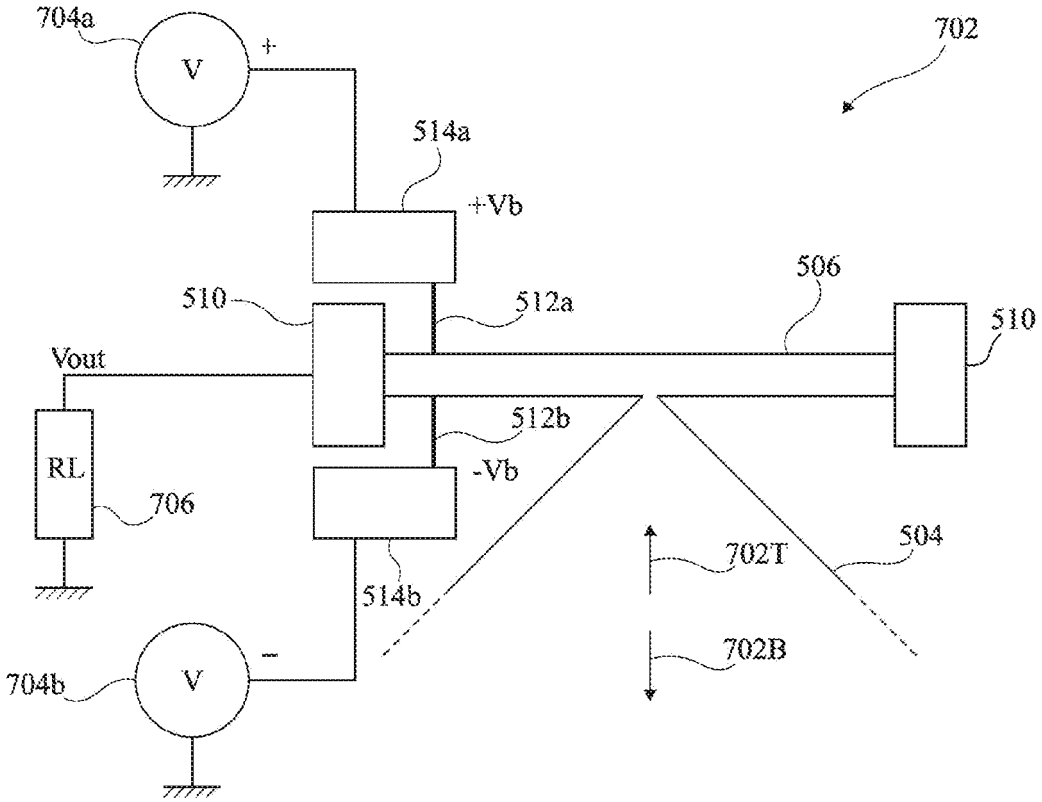


Fig 7

[Fig. 8]

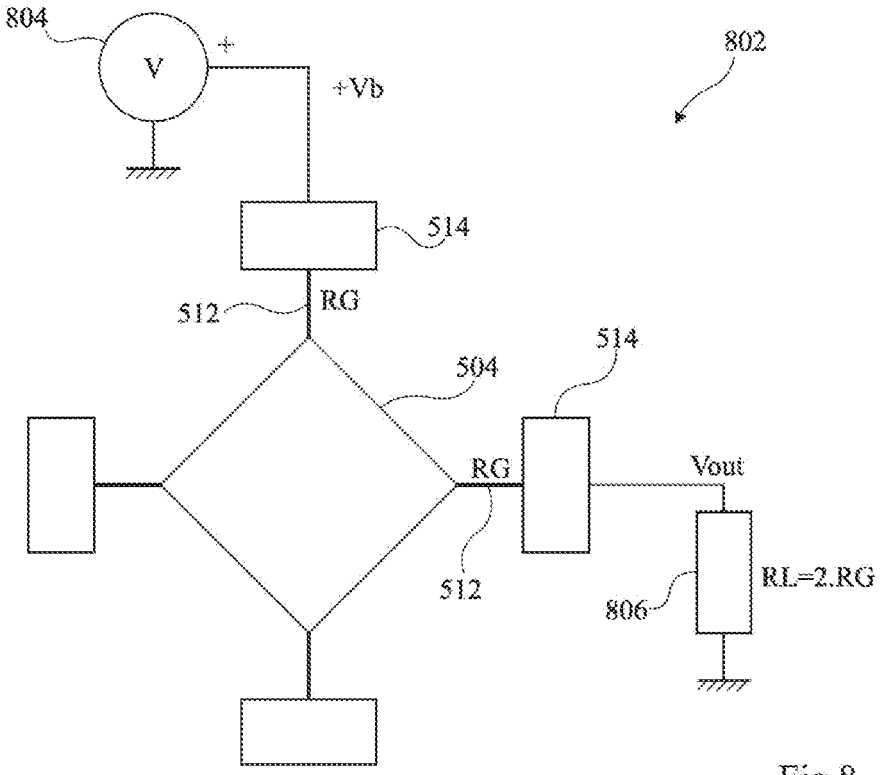


Fig 8

[Fig. 9]

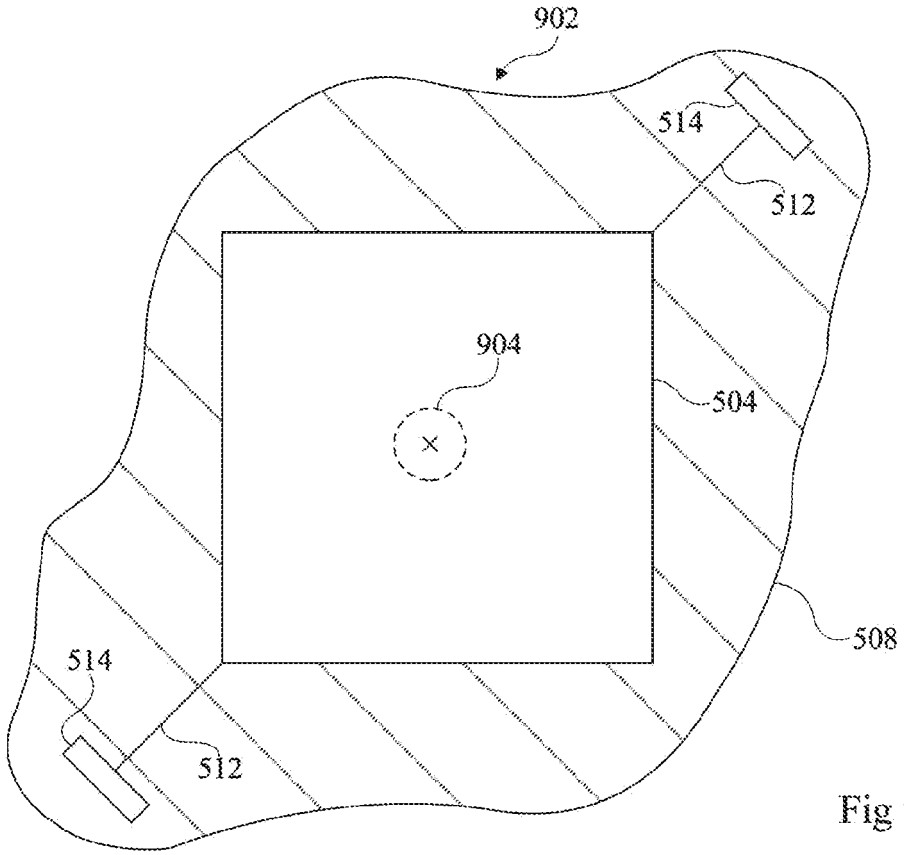


Fig 9

[Fig. 10]

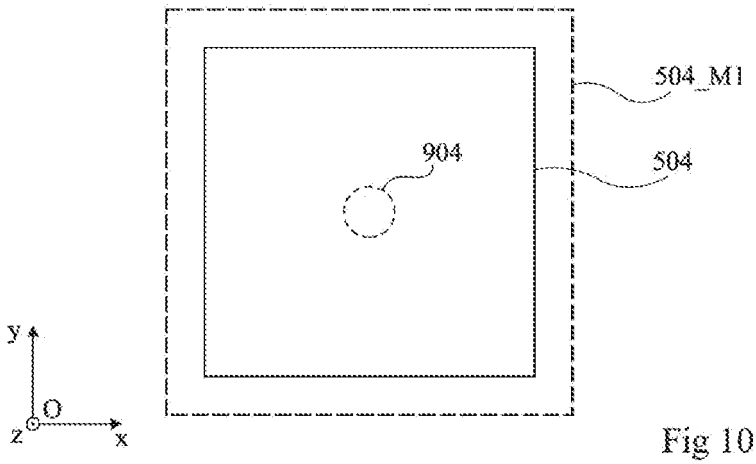


Fig 10

[Fig. 11]

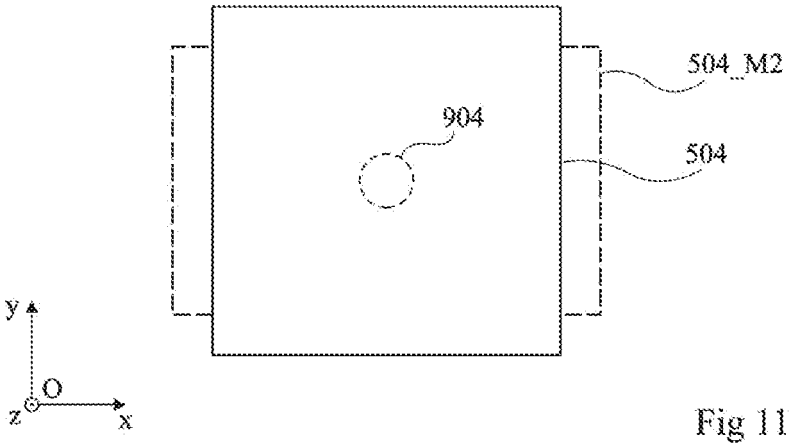


Fig 11

[Fig. 12]

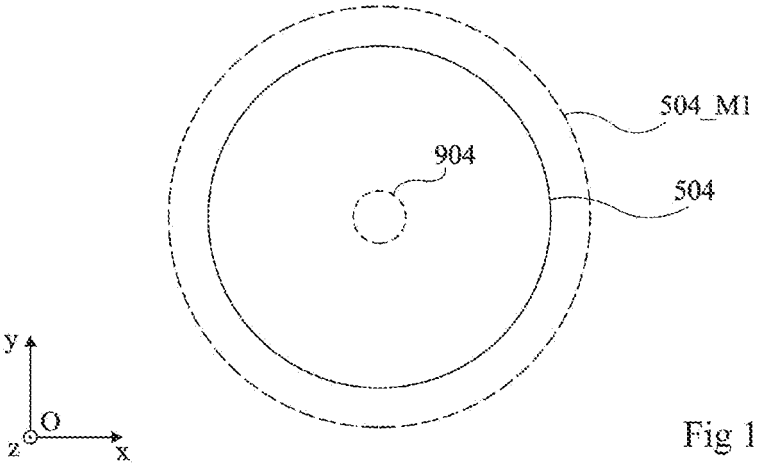


Fig 12

[Fig. 13]

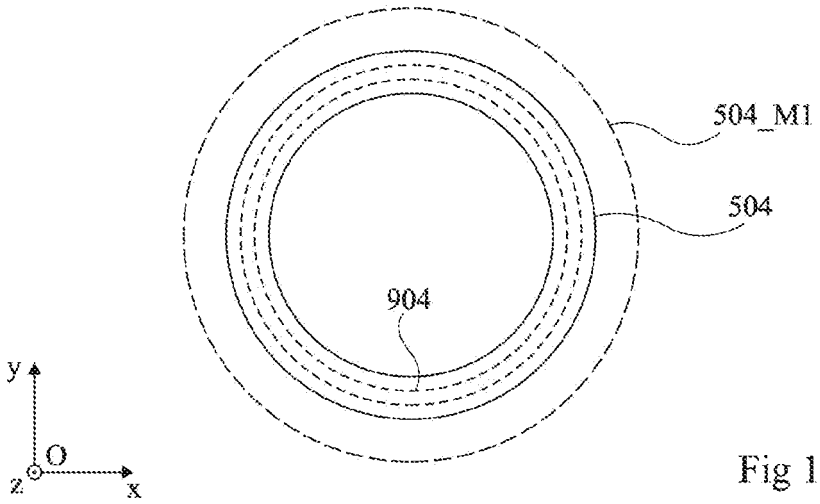


Fig 13

[Fig. 14]

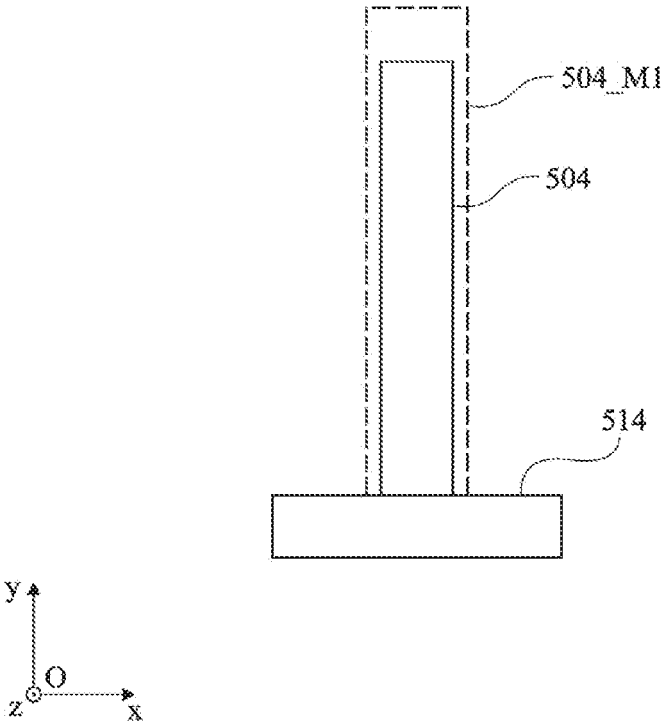


Fig 14

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement national

FA 878580
FR 1914510

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	US 2019/229701 A1 (LI SHENG-SHIAN [TW] ET AL) 25 juillet 2019 (2019-07-25)	1-6, 8-11,13, 14	H03H9/02
Y	* figures 1, 2, 9, 15A, 15B, 16A, 16B *	7	

X	LEHEE GUILLAUME ET AL: "Transduction performance of piezoresistive silicon nanowires on the frequency resolution of a resonant MEMS sensor", 2015 IEEE SENSORS, IEEE, 1 novembre 2015 (2015-11-01), pages 1-4, XP032843906, DOI: 10.1109/ICSENS.2015.7370337 [extrait le 2015-12-31]	1-6,8, 10-13	
Y	* page 1, colonne 2, alinéa 1; figure 6 *	7	

Y	US 2012/105163 A1 (STEENEKEN PETER [NL]) 3 mai 2012 (2012-05-03) * figure 1 *	7	

A	US 2012/092082 A1 (HENTZ SEBASTIEN [FR] ET AL) 19 avril 2012 (2012-04-19) * figures 1, 2, 4, 5 *	1-14	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) H03H

A	US 7 990 232 B1 (LEE SEUNGBAE [US]) 2 août 2011 (2011-08-02) * figure 8 *	1-14	

Date d'achèvement de la recherche	Examinateur
1 août 2020	Naumann, Olaf

CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS

X : particulièrement pertinent à lui seul
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie
A : arrière-plan technologique
O : divulgation non-écrite
P : document intercalaire

T : théorie ou principe à la base de l'invention
E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.
D : cité dans la demande
L : cité pour d'autres raisons
.....
& : membre de la même famille, document correspondant

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1914510 FA 878580

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du 01-08-2020
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)		Date de publication
US 2019229701	A1	25-07-2019	TW	201933638 A	16-08-2019
			US	2019229701 A1	25-07-2019
US 2012105163	A1	03-05-2012	CN	102640417 A	15-08-2012
			EP	2409403 A1	25-01-2012
			US	2012105163 A1	03-05-2012
			WO	2010106485 A1	23-09-2010
US 2012092082	A1	19-04-2012	EP	2441170 A1	18-04-2012
			FR	2946479 A1	10-12-2010
			US	2012092082 A1	19-04-2012
			WO	2010142643 A1	16-12-2010
US 7990232	B1	02-08-2011	AUCUN		

EPO FORM P0465