

⑤④ STRUCTURE PLANE DE RESONATEUR MECANIQUE A VIBRATION D'EXTENSION-COMPRESSION SELON UN MODE PARTIEL EGAL A TROIS.

②② Date de dépôt : 16.12.21.

③③ Priorité :

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux apparentés :

☐ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales Etablissement public à caractère industriel et commercial — FR.*

④③ Date de mise à la disposition du public de la demande : 23.06.23 Bulletin 23/25.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du brevet d'invention : 10.11.23 Bulletin 23/45.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑦② Inventeur(s) : CHAPPELLIER Paul, LAVENUS Pierre, PERRIER Thomas, GAUDINEAU Vincent, LEVY Raphaël et CHARTIER Claude.

⑦③ Titulaire(s) : Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales Etablissement public à caractère industriel et commercial.

⑦④ Mandataire(s) : Plasseraud IP.



Description

Titre de l'invention : STRUCTURE PLANE DE RESONATEUR MECANIQUE A VIBRATION D'EXTENSION-COMPRESSION SELON UN MODE PARTIEL EGAL A TROIS

Domaine technique

[0001] La présente description concerne une structure plane de résonateur mécanique, ainsi qu'un oscillateur électromécanique qui comprend une telle structure.

Technique antérieure

[0002] De nombreuses applications nécessitent de mettre en œuvre des résonateurs mécaniques, parmi lesquelles des dispositifs électroniques ou de communication. L'une des fonctions de tels résonateurs peut être de fournir une base de temps ou une référence de fréquence, par exemple pour constituer une horloge de cadencement pour le fonctionnement du dispositif. Dans ce but, une des qualités recherchées pour le résonateur mécanique est de posséder une valeur de facteur de qualité qui soit très élevée, notamment de l'ordre de 10^5 ou plus. Or plusieurs contributions interviennent dans des réductions du facteur de qualité d'un résonateur mécanique, parmi lesquelles une contribution de viscosité relative au comportement de déformation du matériau qui est utilisé pour constituer le résonateur mécanique, et une transmission d'une partie d'une déformation de vibration à un support du résonateur mécanique.

[0003] Le quartz cristallin présente l'avantage de générer des pertes énergétiques par comportement visqueux qui sont très faibles. En outre, les résonateurs en quartz présentent les avantages suivants par rapport à ceux à base de silicium :

- la stabilité de la fréquence de vibration des résonateurs en quartz lorsque leur température varie, est supérieure à celle des résonateurs à base de silicium ; et
- le quartz fournit un couplage électromécanique qui est supérieur à celui des systèmes à base de silicium.

[0004] Par ailleurs, il est connu que la transmission d'une partie de la déformation de vibration au support du résonateur mécanique peut être réduite dans une grande ampleur en concevant le résonateur pour que sa vibration présente un nœud au niveau de chacune des fixations au support. Pour obtenir des nœuds de vibration qui soient placés ainsi, le résonateur mécanique peut être composé de plusieurs parties, telles que les vibrations de certaines parties compensent, au niveau de chaque fixation au support, des déplacements qui sont provoqués par les vibrations d'une autre partie du résonateur. Par exemple, le document FR 3 002 095 décrit une structure plane de résonateur mécanique qui est constituée d'une poutre principale et de deux poutres latérales, parallèles et reliées par des portions d'attache intermédiaires. Les zones de

fixation de cette structure au support du résonateur sont situées au milieu des bords externes des poutres latérales, à l'opposé des portions d'attache. Pour le mode de vibration qui est exploité, la poutre principale vibre par extension-compression selon le mode fondamental, et les poutres latérales vibrent chacune selon une combinaison d'un mode de déformation par extension compression et d'un mode de déformation par flexion parallèlement au plan du résonateur, selon un mode partiel qui est égal à trois pour les deux modes de déformation de chaque poutre latérale. Une telle vibration de chaque poutre latérale compense alors, au niveau de la zone de fixation qui est située sur cette poutre latérale, les déplacements qui sont appliqués par la vibration de la poutre principale à la portion d'attache qui est intermédiaire entre ces deux poutres.

[0005] Toutefois, à cause de l'utilisation du mode fondamental de vibration de la poutre principale, les structures de résonateurs mécaniques telles que décrites dans FR 3 002 095 sont limitées à des fréquences de vibration qui sont inférieures à 3 MHz (mégahertz). Cette fréquence de vibration peut être augmentée en excitant la structure de résonateur mécanique pour que sa poutre principale vibre par extension-compression aussi selon un mode partiel qui est égal à trois, au lieu du mode fondamental. Mais alors les portions d'attache qui sont intermédiaires entre chaque poutre latérale et la poutre principale subissent des déplacements nettement plus grands, à la fois en translation et en rotation, et les compensations de déplacements qui sont produites par les poutres latérales au niveau des zones de fixation deviennent insuffisantes, comme cela est indiqué dans l'article intitulé «High Q 2D-length extension mode resonators for potential time-frequency applications», de P. Chapellier et al., *Microsystem Technologies*, Springer, 14 août 2019, accessible par <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04575-0>.

[0006] Enfin, à cause de la nécessité bien connue de maintenir un résonateur mécanique à température constante pendant son utilisation, par chauffage, il est particulièrement avantageux que ce résonateur soit de petites dimensions pour réduire une consommation énergétique provoquée par ce chauffage. De telles petites dimensions sont aussi favorables à une miniaturisation des dispositifs qui incorporent les résonateurs, ainsi que pour mettre en œuvre les procédés de fabrication collective des résonateurs.

Problème technique

[0007] A partir de cette situation, un but de la présente invention consiste à fournir un résonateur mécanique pouvant vibrer à une fréquence qui soit supérieure à 5 MHz, et avec une valeur de facteur de qualité qui soit supérieure à 10^5 .

[0008] Un but annexe de l'invention est qu'un tel résonateur mécanique puisse être fabriqué en utilisant des procédés de fabrication collective, afin de réduire le prix de revient à l'unité de chaque résonateur fabriqué.

[0009] Encore un autre but de l'invention est qu'un tel résonateur soit de petites dimensions.

Résumé de l'invention

[0010] Pour atteindre l'un au moins de ces buts ou un autre, un premier aspect de l'invention propose une nouvelle structure plane de résonateur mécanique qui comprend une portion de plaquette («wafer portion» en anglais) de quartz cristallin à faces parallèles, ces faces de la plaquette étant perpendiculaires à l'axe cristallin Z du quartz.

Autrement dit, la structure de résonateur mécanique qui est proposée par l'invention est constituée à partir d'une plaquette dont les faces sont orientées par rapport au cristal de quartz qui constitue cette plaquette. De façon connue, la structure cristalline du quartz est trigonale, couramment appelée quartz α . Ses axes cristallins X, Y et Z sont alors définis de la façon usuelle pour cette structure cristalline. La portion de plaquette comprend :

- une poutre principale qui s'étend longitudinalement parallèlement à l'axe cristallin Y du quartz, cet axe cristallin Y étant parallèle aux faces de la plaquette ;
- deux poutres latérales identiques qui s'étendent chacune longitudinalement aussi parallèlement à l'axe cristallin Y, les deux poutres latérales étant situées symétriquement sur deux côtés opposés de la poutre principale, à l'intérieur de la portion de plaquette ; et
- deux portions d'attache, situées chacune entre la poutre principale et l'une des poutres latérales, à l'intérieur de la portion de plaquette, chacune de ces portions d'attache reliant une zone de milieu d'un bord longitudinal de la poutre principale à une zone de milieu d'un bord longitudinal de la poutre latérale correspondante, appelé bord interne de cette poutre latérale et tourné vers la poutre principale.

Cette structure de résonateur mécanique est symétrique en l'absence de vibration, d'une part par rapport à un axe longitudinal central de la poutre principale, appelé axe principal, et d'autre part par rapport à un plan médian qui est perpendiculaire à cet axe principal et qui passe par les portions d'attache. L'axe principal de la structure est donc parallèle à l'axe cristallin Y du quartz qui constitue la portion de plaquette, et le plan médian est parallèle à ses axes cristallins X et Z. Ce plan médian est donc perpendiculaire aux faces de la plaquette.

[0011] Cette structure de résonateur mécanique est destinée à être supportée par deux zones de fixation qui sont situées une-à-une sur les deux poutres latérales, chacune au milieu d'un bord longitudinal externe de la poutre latérale correspondante, opposé à son bord interne. Autrement dit, la structure de résonateur mécanique est destinée à être connectée mécaniquement à un support externe au niveau des zones de fixation. Une telle connexion au support peut être réalisée par collage, ou bien le support peut être constitué par une partie supplémentaire de la plaquette, sans limitation.

- [0012] Selon une première caractéristique de la structure de résonateur mécanique de l'invention, une épaisseur de la plaquette est comprise entre 50 μm (micromètre) et 150 μm , mesurée perpendiculairement aux faces de cette plaquette. Cet intervalle d'épaisseur permet à la portion de plaquette d'être découpée en utilisant un procédé de gravure ionique profonde. Un tel procédé est compatible avec une fabrication collective, ou simultanée, de plusieurs structures de résonateurs mécaniques à partir d'une même plaquette de quartz. Ainsi, le prix de revient à l'unité de chaque structure de résonateur peut être réduit.
- [0013] La structure de résonateur mécanique de l'invention possède en outre les caractéristiques additionnelles suivantes, à l'intérieur d'un plan quelconque qui est parallèle aux faces de la plaquette et intermédiaire entre ses faces :
- la poutre principale possède une valeur d'élancement qui est comprise entre 3,9 et 4,2 ; et
 - chaque poutre latérale possède une autre valeur d'élancement qui est comprise entre 1,7 et 2,0, et une longueur, mesurée parallèlement à l'axe principal, qui est comprise entre 2,0 et 2,3 fois une largeur de la poutre principale, mesurée perpendiculaire à l'axe principal.
- De façon usuelle, l'élancement d'une poutre à l'intérieur d'un plan considéré qui est parallèle à la direction d'extension longitudinale de cette poutre, est égal au quotient de la longueur de la poutre par sa largeur telle qu'existant dans ce plan. L'épaisseur de la poutre correspond alors à sa dimension mesurée perpendiculairement au plan considéré.
- [0014] Grâce au dimensionnement proposé par l'invention pour la poutre principale et les deux poutres latérales, lorsque la poutre principale est animée d'une vibration par extension-compression parallèlement à l'axe principal, selon un mode partiel de vibration égal à trois, cette vibration de la poutre principale provoque, à travers les portions d'attache, des vibrations par flexion de chacune des deux poutres latérales, aussi selon un mode partiel de vibration égal à trois, ces vibrations par flexion étant parallèles aux faces de la plaquette. En outre, les vibrations par flexion des poutres latérales produisent, pour chacune des deux zones de fixation de la structure, une compensation au moins partielle de mouvements de rotation et de mouvements de translation qui sont transmis par la vibration de la poutre principale aux deux portions d'attache. Ainsi, la structure de résonateur mécanique de l'invention peut posséder une valeur de facteur de qualité qui est très élevée, notamment supérieure à 10^5 . En effet, la compensation des mouvements de vibration au niveau des zones de fixation évite qu'une fraction significative de l'énergie de vibration soit transmise au support de la structure de résonateur mécanique, et perdue.
- [0015] La fréquence de vibration de la structure de résonateur dépend de la longueur de la

poutre principale, mesurée parallèlement à l'axe principal. Avantageusement, cette longueur peut être sélectionnée de sorte qu'un mode propre de vibration de la structure, qui comprend la vibration par extension-compression de la poutre principale et les vibrations par flexion des deux poutres latérales, toutes selon le mode partiel de vibration égal à trois, ait une valeur de fréquence comprise entre 5 MHz et 40 MHz. En particulier, cette valeur de fréquence du mode propre de vibration de la structure peut être comprise entre 8 MHz et 20 MHz, par exemple sensiblement égale à 10 MHz.

[0016] Dans ce mode propre de vibration de l'ensemble de la structure de résonateur, chaque poutre latérale peut avoir une vibration dite forcée, c'est-à-dire à une fréquence qui est imposée par la poutre principale sans être une fréquence de mode propre individuel de cette poutre latérale, considérée isolément. Ainsi, chaque poutre latérale possédant un mode propre individuel partiel d'ordre trois, de vibration par flexion parallèlement aux faces de la plaquette, la valeur de fréquence de ce mode propre individuel de chaque poutre latérale peut être supérieure à la valeur de fréquence du mode propre de la structure qui comprend la vibration par extension-compression de la poutre principale et les vibrations par flexion des deux poutres latérales, toutes selon le mode partiel de vibration égal à trois.

[0017] Dans des modes préférés de réalisation de l'invention, l'une au moins des caractéristiques additionnelles suivantes peut être reproduite optionnellement, seule ou en combinaison de plusieurs d'entre elles :

l'épaisseur de la plaquette peut être comprise entre 80 μm et 120 μm , mesurée perpendiculairement aux faces de cette plaquette. Notamment, elle peut être sensiblement égale à 100 μm ;

la poutre principale peut posséder une longueur qui est comprise entre 700 μm et 900 μm , mesurée parallèlement à l'axe principal ; et

la valeur d'élanement de chaque poutre latérale peut être comprise entre 1,84 et 1,87, à l'intérieur d'un plan quelconque qui est parallèle aux faces de la plaquette et intermédiaire entre ces faces.

[0018] La structure peut comprendre en outre, sur chacune des deux faces de la plaquette et d'une façon qui est identique par superposition des deux faces à travers la plaquette, six électrodes qui sont disposées sur la poutre principale selon deux colonnes identiques et juxtaposées de trois électrodes, chaque colonne étant parallèle à l'axe principal. Alors, celles des électrodes de chaque face qui sont situées en quinconce les unes par rapport aux autres dans cette face sont reliées électriquement entre elles, sélectivement par rapport aux autres électrodes de la même face, formant ainsi deux groupes d'électrodes sur chaque face de la plaquette. De plus, chaque groupe d'électrodes de chaque face est relié électriquement à celui des deux groupes d'électrodes de l'autre face qui est situé en superposition à travers la plaquette. Une

telle disposition des électrodes est particulièrement adaptée pour exciter sélectivement la vibration par extension-compression de la poutre principale, selon le mode partiel de vibration égal à trois.

[0019] Un deuxième aspect de l'invention propose un oscillateur électromécanique qui comprend :

- une structure conforme au premier aspect de l'invention ; et
- un circuit électronique, qui est connecté électriquement à la structure et adapté pour compenser des pertes énergétiques de cette structure, de sorte que l'oscillateur électromécanique délivre continuellement un signal de sortie basé sur le mode propre de la structure qui comprend la vibration par extension-compression de la poutre principale et les vibrations par flexion des deux poutres latérales, toutes selon le mode partiel de vibration égal à trois.

[0020] Enfin, un troisième aspect de l'invention concerne un dispositif électronique ou de communication, qui comprend un circuit d'horloge, ce circuit d'horloge incorporant un oscillateur électromécanique conforme au deuxième aspect ci-dessus.

Brève description des figures

[0021] Les caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront plus clairement dans la description détaillée ci-après d'exemples de réalisation non-limitatifs, en référence aux figures annexées parmi lesquelles :

[0022] [Fig.1] est une vue en perspective d'une structure plane de résonateur mécanique conforme à la présente invention ;

[0023] [Fig.2a] est une vue en coupe transversale qui montre une déformation par extension d'une poutre principale faisant partie de la structure plane de résonateur mécanique de [Fig.1] ;

[0024] [Fig.2b] est une vue en perspective qui correspond à [Fig.2a] ;

[0025] [Fig.2c] correspond à [Fig.2a] pour une déformation par compression de la poutre principale ;

[0026] [Fig.2d] est une vue en plan qui montre une déformation de l'ensemble de la structure plane de résonateur mécanique de [Fig.1], lorsque la poutre principale est déformée par extension comme représenté dans [Fig.2a] et [Fig.2b] ;

[0027] [Fig.2e] correspond à [Fig.2d], lorsque la poutre principale est déformée par compression comme représenté dans [Fig.2c] ;

[0028] [Fig.3a] est une vue en plan d'une partie centrale d'une poutre latérale de la structure plane de résonateur mécanique de [Fig.1], pour la déformation par extension de la poutre principale ;

[0029] [Fig.3b] correspond à [Fig.3a] pour la déformation par compression de la poutre principale ;

- [0030] [Fig.3c] correspond à [Fig.3a] en réduisant une valeur d'élancement de chaque poutre latérale, à valeur constante de largeur individuelle des poutres latérales ;
- [0031] [Fig.3d] correspond à [Fig.3c] pour la déformation par compression de la poutre principale ;
- [0032] [Fig.3e] correspond à [Fig.3a] en augmentant la valeur d'élancement de chaque poutre latérale, à valeur constante de largeur individuelle des poutres latérales ;
- [0033] [Fig.3f] correspond à [Fig.3e] pour la déformation par compression de la poutre principale ;
- [0034] [Fig.3g] correspond à [Fig.3a] en réduisant la valeur d'élancement de chaque poutre latérale, à valeur constante de longueur individuelle des poutres latérales ;
- [0035] [Fig.3h] correspond à [Fig.3g] pour la déformation par compression de la poutre principale ;
- [0036] [Fig.3i] correspond à [Fig.3a] en augmentant la valeur d'élancement de chaque poutre latérale, à valeur constante de longueur individuelle des poutres latérales ;
- [0037] [Fig.3j] correspond à [Fig.3j] pour la déformation par compression de la poutre principale ;
- [0038] [Fig.4] est une vue en plan qui montre une disposition d'électrodes sur la structure plane de résonateur mécanique de [Fig.1] ; et
- [0039] [Fig.5] est un diagramme d'un oscillateur électromécanique qui comprend la structure plane de résonateur mécanique de [Fig.1].

Description détaillée de l'invention

- [0040] Pour raison de clarté, les dimensions des éléments qui sont représentés dans ces figures ne correspondent ni à des dimensions réelles, ni à des rapports de dimensions réels. Notamment, les déformations qui sont représentées sont très exagérées pour apparaître clairement. Les contours en traits interrompus fins, lorsqu'ils sont indiqués, représentent la structure plane de résonateur mécanique en l'absence de déformation. En outre, des références identiques qui sont indiquées dans des figures différentes désignent des éléments identiques, y compris pour la désignation des axes cristallins X, Y et Z.
- [0041] Conformément à [Fig.1], une structure plane de résonateur mécanique conforme à l'invention est découpée dans une plaquette à faces parallèle de quartz α . Elle est désignée globalement par la référence 1. L'axe Z de la structure cristalline du quartz α est perpendiculaire aux deux faces de la plaquette. Dans le jargon de l'Homme du métier, la plaquette est une coupe tournée selon l'axe Z du quartz α . La portion de plaquette qui forme la structure de résonateur mécanique 1 est monolithique, et comprend une poutre principale 10, deux poutres latérales 11a et 11b, et deux portions d'attache 12a et 12b. Les trois poutres 10, 11a et 11b sont parallèles, avec leur

direction d'extension longitudinale commune qui est parallèle à l'axe cristallin Y du quartz α . Les poutres latérales 11a et 11b sont situées sur deux côtés opposés de la poutre principale 10, symétriquement. La portion d'attache 12a relie une zone centrale d'un bord longitudinal 11a_i de la poutre latérale 11a, qui est tourné vers la poutre principale 10, à une zone centrale d'un bord longitudinal 10a de cette dernière. De même, la portion d'attache 12b relie une zone centrale d'un bord longitudinal 11b_i de la poutre latérale 11b, qui est aussi tourné vers la poutre principale 10, à une zone centrale d'un bord longitudinal 10b de cette dernière. Les deux bords longitudinaux 10a et 10b de la poutre principale 10 sont opposés l'un par rapport à l'autre. Chaque portion d'attache 12a (respectivement 12b) réalise une connexion rigide entre la poutre principale 10 et la poutre latérale correspondante 11a (resp. 11b). Elles peuvent avoir chacune une forme générale de parallélépipède rectangle, et être identiques. La portion de plaquette de la structure de résonateur 1 possède les symétries suivantes, dans sa géométrie : elle est symétrique par rapport à un axe central longitudinal de la poutre principale 10, appelé axe principal et noté Δ , qui est parallèle à l'axe cristallin Y, et elle est aussi symétrique par rapport à un plan, appelé plan médian et noté π , qui est parallèle aux axes cristallins X et Z et qui passe par des points centraux des portions d'attache 12a et 12b.

[0042] Les notations qui sont indiquées dans [Fig.1] ont les significations suivantes :

e : épaisseur de la plaquette, mesurée perpendiculairement aux deux faces de cette plaquette, et par exemple égale à 100 μm ,

L_{10} : longueur de la poutre principale 10, mesurée parallèlement à l'axe principal Δ , et par exemple égale à 809 μm ,

d_{10} : largeur de la poutre principale 10, mesurée parallèlement aux faces de la plaquette et perpendiculairement à l'axe principal Δ , et par exemple égale à 200 μm ,

L_{11} : longueur de chaque poutre secondaire 11a, 11b, mesurée parallèlement à l'axe principal Δ , et par exemple égale à 430 μm ,

d_{11} : largeur de chaque poutre secondaire 11a, 11b, mesurée parallèlement aux faces de la plaquette et perpendiculairement à l'axe principal Δ , et par exemple égale à 232 μm ,

d_{12} : longueur de chaque portion d'attache 12a, 12b, mesurée parallèlement aux faces de la plaquette et perpendiculairement à l'axe principal Δ , et par exemple égale à 56 μm ; et

e_{12} : largeur de chaque portion d'attache 12a, 12b, mesurée parallèlement à l'axe principal Δ , et par exemple égale à 65 μm .

La structure de résonateur mécanique 1 qui correspond à ces dimensions pour la portion de plaquette de quartz est suffisamment petite pour permettre une miniaturisation d'un oscillateur électromécanique qui incorpore cette structure. De plus, une

telle portion de plaquette peut être découpée en utilisant un procédé de gravure ionique profonde, connue de l'Homme du métier. Par ailleurs, les valeurs de quotients suivantes sont obtenues pour les valeurs numériques données précédemment :

élancement de la poutre principale 10 : $L_{10}/d_{10} = 4,045$

élancement de chaque poutre latérale 11a, 11b : $L_{11}/d_{11} = 1,853$

quotient de la demi-longueur de chaque poutre latérale 11a, 11b sur la largeur de la poutre principale 10 : $L_{11}/(2 \cdot d_{10}) = 1,075$, soit $L_{11} = 2,15 \cdot d_{10}$

[0043] Le mode propre de vibration de la structure de résonateur mécanique 1, qui est destiné à être utilisé par un oscillateur électromécanique incorporant cette structure, est décrit maintenant, en référence à [Fig.2a]-[Fig.2e].

[0044] Une première partie de ce mode propre de vibration de la structure de résonateur mécanique 1 concerne la poutre principale 10. Cette poutre principale 10 vibre par extension-compression parallèlement à l'axe cristallin Y selon un mode partiel qui est égal à trois. [Fig.2a], qui est tracée dans le plan YZ montre la déformation par extension. En divisant fictivement la poutre principale 10 en trois segments de mêmes longueurs selon l'axe cristallin Y, le segment central P_0 est déformé par compression et les deux segments extrêmes P_1 et P_2 sont déformés simultanément par extension. Ces déformations respectives par segments se combinent pour produire l'extension de l'ensemble de la poutre principale 10 parallèlement à l'axe cristallin Y. Par ailleurs, cette déformation par extension de l'ensemble de la poutre principale 10 provoque les deux composantes de déplacement simultanées suivantes, pour chaque portion d'attache 12a, 12b :

- un gonflement du segment central P_0 parallèlement à l'axe cristallin X, qui résulte de l'effet de Poisson dans ce segment central P_0 , et qui écarte latéralement les deux portions d'attache 12a et 12b l'une par rapport à l'autre, aussi parallèlement à l'axe cristallin X ; et

- à cause de la structure cristalline trigonale du quartz α , et de l'orientation de la plaquette utilisée par rapport à cette structure cristalline, la déformation par extension de la poutre principale 10 est accompagnée d'une déformation variable par flexion dans le plan YZ, telle que représentée dans [Fig.2a]. Il en résulte une rotation de chaque portion d'attache 12a, 12b autour d'un axe qui passe par le centre de celle-ci et qui est parallèle à l'axe cristallin X.

[0045] [Fig.2b] est une vue en perspective de la poutre principale 10 qui correspond à la même déformation de celle-ci par extension que [Fig.2a].

[0046] [Fig.2c] correspond à [Fig.2a] pour une déformation de la poutre principale 10 par compression parallèlement à l'axe cristallin Y encore selon le mode partiel qui est égal à trois. Le segment central P_0 est alors déformé par extension et les deux segments extrêmes P_1 et P_2 sont simultanément déformés par compression. Chaque portion

d'attache 12a, 12b subit alors encore les deux composantes de déplacement, mais chacune en sens inverse par rapport au cas de la déformation par extension de la poutre principale 10 : les deux portions d'attache 12a, 12b se rapprochent l'une de l'autre selon l'axe cristallin X, et le sens de rotation de chaque portion d'attache 12a, 12b autour de l'axe cristallin X est inverse dans [Fig.2c] par rapport à [Fig.2a].

[0047] La vibration de la poutre principale 10 est constituée par une alternance entre des extensions conformes à [Fig.2a] et des compressions conformes à [Fig.2c], à une fréquence qui est sensiblement une fréquence propre pour cette poutre principale 10.

[0048] A cause des mouvements des deux portions d'attache 12a et 12b indiqués ci-dessus, la vibration de la poutre centrale 10 est transmise partiellement à chacune des poutres latérales 11a et 11b, si bien que ces dernières sont mises en vibration par la poutre principale 10 selon un régime dit forcé par l'Homme du métier. En effet, les poutres latérales 11a et 11b sont ainsi mises en vibration à une fréquence qui est distincte de leurs fréquences de modes propres de vibration. Chaque poutre latérale 11a, 11b est ainsi mise en vibration par flexion parallèlement au plan XY, et les dimensions précitées pour les poutres latérales ont été sélectionnées pour que cette vibration par flexion corresponde à un mode partiel égal à trois. [Fig.2d] et [Fig.2e] montrent ainsi les déformations de l'ensemble de la structure de résonateur mécanique 1, y compris les déformations des poutres latérales 11a et 11b, lorsque la poutre principale 10 est déformée par extension ([Fig.2d]) et par compression ([Fig.2e]). Conformément au mode partiel de vibration par flexion égal à trois, chaque poutre latérale 11a, 11b présente, à l'intérieur du plan XY et à chaque instant de la vibration, une même courbure dans deux segments extrêmes de cette poutre latérale, qui est opposée à une courbure qui existe au même instant dans un segment central de la même poutre latérale, les segments extrêmes et central formant une division de la poutre parallèlement à l'axe cristallin Y en trois parties d'égales longueurs. [Fig.2d] et [Fig.2e] font apparaître les déplacements des deux portions d'attache 12a et 12b par translation parallèlement à l'axe cristallin X, ainsi qu'une rotation de chaque portion d'attache 12a, 12b autour de cet axe, d'un angle qui est variable en se déplaçant dans chaque portion d'attache parallèlement à l'axe cristallin X. Ainsi, en plus d'être translatée, chaque portion d'attache 12a, 12b est vrillée dans un sens puis dans le sens inverse pendant chaque période de vibration de la structure de résonateur mécanique 1.

[0049] La structure de résonateur mécanique 1 est destinée à être fixée à un support (non représenté dans les figures) par deux zones de celle-ci, dites zones de fixation et désignées dans les figures par les références 13a et 13b. La zone de fixation 13a est située au niveau d'un centre d'un bord longitudinal 11a_e de la poutre latérale 11a (voir [Fig.1]), qui est opposé à son bord longitudinal 11a_i introduit plus haut. Les bords longitudinaux 11a_i et 11a_e ont été appelés bords longitudinaux interne et externe de la

poutre latérale 11a dans la partie générale de la présente description. Symétriquement, la zone de fixation 13b est située au niveau d'un centre d'un bord longitudinal 11b_e de la poutre latérale 11b, qui est opposé à son bord longitudinal 11b_i. Les bords longitudinaux 11b_i et 11b_e sont ainsi les bords longitudinaux interne et externe de la poutre latérale 11b.

[0050] Grâce au dimensionnement de la poutre latérale 11a qui est apporté par l'invention, lorsque la zone de fixation 13a est raccordée au support et que la poutre latérale 11a vibre par flexion comme décrit ci-dessus en étant mise en vibration par la poutre principale 10, la vibration de la poutre latérale 11a se combine avec celle de la poutre principale 10 et les déformations de la portion d'attache 12a qui résultent de ces vibrations, en réduisant dans une grande mesure des déplacements susceptibles d'affecter la zone de fixation 13a. Autrement dit, la vibration de la poutre latérale 11a permet de compenser au moins partiellement les déplacements par translation parallèlement à l'axe cristallin X, et par rotation autour de cet axe, de la portion d'attache 12a par rapport à la zone de fixation 13a. Une même compensation est produite symétriquement par la poutre latérale 11b. Ainsi, les zones de fixation 13a et 13b ne subissent pas de déplacements significatifs, si bien qu'une partie très faible d'énergie de vibration est transmise au support. Grâce aux compensations de déplacements que produisent les poutres latérales 11a et 11b, la structure de résonateur mécanique 1 possède une valeur de facteur de qualité qui est supérieure à $3 \cdot 10^5$, pour le mode de vibration qui a été décrit. Sa fréquence de vibration, pour les valeurs numériques qui ont été citées plus haut, est sensiblement égale à 10,0 MHz. La fréquence du mode propre individuel de vibration par flexion dans le plan XY de chaque poutre latérale 11a, 11b, selon le mode partiel égal à trois, est sensiblement égale à 10,2 MHz.

[0051] A titre d'illustration de l'efficacité de l'invention pour produire les compensations décrites ci-dessus, [Fig.3a]-[Fig.3f] représentent la partie centrale de la poutre latérale 11b lorsque les deux poutres latérales ont les valeurs suivantes d'élancement L_{11}/d_{11} dans le plan XY : 1,85 pour [Fig.3a] et [Fig.3b], correspondant au dimensionnement de l'invention, 1,42 pour [Fig.3c] et [Fig.3d], et 2,71 pour [Fig.3e] et [Fig.3f]. La largeur d_{11} des poutres latérales 11a et 11b est égale à 232 μm dans les trois cas, et c'est la longueur L_{11} qui varie d'un cas à l'autre. [Fig.3a], [Fig.3c] et [Fig.3e] correspondent à un instant de déformation par extension pour la poutre principale 10 selon [Fig.2a], et [Fig.3b], [Fig.3d] et [Fig.3f] correspondent à un instant de déformation par compression de la poutre principale 10 selon [Fig.2c]. La comparaison de ces figures par paires correspondant aux différents dimensionnements de poutre latérale, montre que seul le dimensionnement de l'invention ([Fig.3a] et [Fig.3b]) supprime les mouvements de la zone de fixation 13b.

[0052] A titre d'illustration complémentaire, [Fig.3g]-[Fig.3j] représentent de même la

partie centrale de la poutre latérale 11b lorsque les deux poutres latérales ont les valeurs suivantes d'élancement L_{11}/d_{11} dans le plan XY : 1,43 pour [Fig.3g] et [Fig.3h], et 4,30 pour [Fig. 4i] et [Fig. 4j]. Cette fois-ci, la longueur L_{11} des poutres latérales 11a et 11b est égale à 430 μm pour ces quatre figures supplémentaires, et c'est la largeur d_{11} qui varie. [Fig.3g] et [Fig.3i] correspondent à l'instant de déformation par extension de la poutre principale 10 déjà considéré, selon [Fig.2a], et [Fig. 4h] et [Fig. 4j] correspondent à l'instant de déformation par compression de la poutre principale 10 selon [Fig.2c]. La comparaison de ces figures supplémentaires, encore par paires correspondant aux différents dimensionnements de poutre latérale, et avec [Fig.3a] et [Fig.3b] pour le dimensionnement selon l'invention, montre encore que seul ce dernier supprime les mouvements de la zone de fixation 13b.

[0053] Un ensemble d'électrodes qui est adapté pour produire la vibration décrite précédemment pour la structure de résonateur mécanique 1, est montrée dans [Fig.4]. Cet ensemble d'électrodes peut être dépourvu d'électrodes sur les poutres latérales 11a et 11b, et ne comporter d'électrodes que sur la poutre principale 10. Il comporte ainsi deux matrices identiques chacune de 2 x 3 électrodes, sur chaque face de la portion de plaquette, sur la poutre principale 10. Pour chaque face, les électrodes E_{01} et E_{02} sont portées par le segment P_0 , E_{11} et E_{12} sont portées par le segment P_1 , et E_{21} et E_{22} sont portées par le segment P_2 . Les électrodes E_{01} et E_{12} et E_{22} sont connectées électriquement entre elles par exemple par les liaisons conductrices L_1 et L_2 , et les électrodes E_{02} et E_{11} et E_{21} sont aussi connectées électriquement entre elles, indépendamment des électrodes E_{01} et E_{12} et E_{22} , par exemple par les liaisons conductrices L_3 et L_4 . En outre, les électrodes qui sont situées en vis-à-vis à travers la portion de plaquette sont aussi connectées électriquement entre elles, d'une façon interne à la structure de résonateur mécanique 1, ou adaptées pour être connectées électriquement entre elles par des connexions électriques externes. Les connexions électriques L_5 et L_6 , et éventuellement des connexions similaires qui sont portées par l'autre face de la portion de plaquette, servent à relier toutes les électrodes à un circuit électronique externe, et possiblement aussi à connecter les électrodes les unes aux autres entre les deux faces comme décrit juste avant.

[0054] [Fig.5] montre symboliquement un oscillateur électromécanique qui incorpore la structure de résonateur mécanique 1. Un tel oscillateur peut former un module d'horloge qui fournit une base de temps ou une référence de fréquence à un dispositif 100, par exemple un dispositif électronique ou de communication. De façon connue, la structure de résonateur 1 est reliée par ses électrodes à un circuit électronique 2, selon une structure en boucle de transmission de signaux électriques d'excitation S_{exc} et de réponse S_{rep} pour produire une oscillation continue. Le circuit électronique 2 comprend un amplificateur 21, qui est conçu pour compenser toutes les pertes énergétiques qui

interviennent lors des oscillations, et optionnellement un filtre 22 qui transmet les signaux à la fréquence de vibration de la structure de résonateur mécanique 1, pour le mode de vibration voulu. La constitution d'un oscillateur à partir d'un résonateur mécanique étant très connue de l'Homme du métier, il n'est pas nécessaire de la décrire plus ici.

[0055] Avantageusement, au moins la structure de résonateur mécanique 1, mais de préférence aussi le circuit électronique 2 de l'oscillateur électromécanique, peut (peuvent) être contenu(s) dans une enceinte thermostatée 3 qui est munie d'un système de chauffage 4. Ainsi, les composants de l'oscillateur électromécanique dont les fonctionnements sont les plus sensibles à des variations de température, peuvent être maintenus à température constante. En particulier, la fréquence du mode propre de vibration de la structure de résonateur mécanique 1, qui dépend de la température à travers les coefficients de déformation élastique du quartz, est maintenue constante de cette façon. Une consommation énergétique du système de chauffage 4 est d'autant moins grande que le système de chauffage 4 est de faibles dimensions.

[0056] Il est entendu que l'invention peut être reproduite en modifiant des aspects secondaires du mode de réalisation qui a été décrit en détail ci-dessus, tout en conservant certains au moins des avantages cités. Notamment, toutes les valeurs numériques qui ont été fournies ne l'ont été qu'à titre d'illustration, et peuvent être changées en fonction de l'application considérée.

Revendications

[Revendication 1]

Structure plane de résonateur mécanique (1) comprenant une portion de plaquette de quartz cristallin à faces parallèles, lesdites faces de la plaquette étant perpendiculaires à un axe cristallin Z du quartz, ladite portion de plaquette comprenant :

- une poutre principale (10) qui s'étend longitudinalement parallèlement à un axe cristallin Y du quartz, ledit axe cristallin Y étant parallèle aux faces de la plaquette ;
- deux poutres latérales (11a, 11b) identiques qui s'étendent chacune longitudinalement aussi parallèlement à l'axe cristallin Y, les deux poutres latérales étant situées symétriquement sur deux côtés opposés de la poutre principale (10), à l'intérieur de la portion de plaquette ; et
- deux portions d'attache (12a, 12b), situées chacune entre la poutre principale (10) et l'une des poutres latérales (11a, 11b), à l'intérieur de la portion de plaquette, chacune desdites portions d'attache reliant une zone de milieu d'un bord longitudinal (10a, 10b) de la poutre principale (10) à une zone de milieu d'un bord longitudinal de la poutre latérale correspondante, appelé bord interne (11a_i, 11b_i) de ladite poutre latérale et tourné vers ladite poutre principale,

la structure (1) étant symétrique en l'absence de vibration, d'une part par rapport à un axe longitudinal central de la poutre principale (10), appelé axe principal (Δ), et d'autre part par rapport à un plan médian (π) qui est perpendiculaire audit axe principal et qui passe par les portions d'attache (12a, 12b),

la structure (1) étant destinée à être supportée par deux zones de fixation (13a, 13b) qui sont situées une-à-une sur les deux poutres latérales (11a, 11b), chacune au milieu d'un bord longitudinal externe (11a_e, 11b_e) de la poutre latérale correspondante, opposé au bord interne (11a_i, 11b_i) de ladite poutre latérale,

une épaisseur de la plaquette étant comprise entre 50 μm et 150 μm , mesurée perpendiculairement aux faces de ladite plaquette,

la structure (1) étant caractérisée en ce que, à l'intérieur d'un plan quelconque qui est parallèle aux faces de la plaquette et intermédiaire entre lesdites faces :

la poutre principale (10) possède une valeur d'élancement qui est comprise entre 3,9 et 4,2 ; et

chaque poutre latérale (11a, 11b) possède une autre valeur d'élancement

qui est comprise entre 1,7 et 2,0, et une longueur (L_{11}), mesurée parallèlement à l'axe principal (Δ), qui est comprise entre 2,0 et 2,3 fois une largeur (d_{10}) de la poutre principale (10), mesurée perpendiculaire audit axe principal,

de sorte que, lorsque la poutre principale (10) est animée d'une vibration par extension-compression parallèlement à l'axe principal (Δ), selon un mode partiel de vibration égal à trois, ladite vibration de la poutre principale provoque, à travers les portions d'attache (12a, 12b), des vibrations par flexion de chacune des deux poutres latérales (11a, 11b), aussi selon un mode partiel de vibration égal à trois, lesdites vibrations par flexion étant parallèles aux faces de la plaquette, les vibrations par flexion des poutres latérales (11a, 11b) produisant, pour chacune des deux zones de fixation (13a, 13b) de la structure (1), une compensation au moins partielle de mouvements de rotation et de mouvements de translation qui sont transmis par la vibration de la poutre principale (10) aux deux portions d'attache (12a, 12b).

[Revendication 2] Structure (1) selon la revendication 1, dans laquelle l'épaisseur (e) de la plaquette est comprise entre 80 μm et 120 μm , mesurée perpendiculairement aux faces de ladite plaquette.

[Revendication 3] Structure (1) selon la revendication 1 ou 2, dans laquelle une longueur (L_{10}) de la poutre principale (10), mesurée parallèlement à l'axe principal (Δ), est sélectionnée de sorte qu'un mode propre de vibration de la structure, qui comprend la vibration par extension-compression de la poutre principale et les vibrations par flexion des deux poutres latérales (11a, 11b), toutes selon le mode partiel de vibration égal à trois, ait une valeur de fréquence comprise entre 5 MHz et 40 MHz.

[Revendication 4] Structure (1) selon la revendication 3, dans lequel chaque poutre latérale (11a, 11b) possède un mode propre individuel partiel d'ordre trois, de vibration par flexion parallèlement aux faces de la plaquette, dont une valeur de fréquence est supérieure à la valeur de fréquence du mode propre de la structure qui comprend la vibration par extension-compression de la poutre principale (10) et les vibrations par flexion des deux poutres latérales, toutes selon le mode partiel de vibration égal à trois.

[Revendication 5] Structure (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle la poutre principale (10) possède une longueur qui est comprise entre 700 μm et 900 μm , mesurée parallèlement à l'axe principal (Δ).

- [Revendication 6] Structure (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle la valeur d'élancement de chaque poutre latérale (11a, 11b) est comprise entre 1,84 et 1,87, à l'intérieur d'un plan quelconque qui est parallèle aux faces de la plaquette et intermédiaire entre lesdites faces.
- [Revendication 7] Structure (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, comprenant en outre, sur chacune des deux faces de la plaquette et d'une façon qui est identique par superposition des deux faces à travers la plaquette, six électrodes (E_{01} , E_{11} , E_{21} , E_{02} , E_{12} , E_{22}) disposées sur la poutre principale (10) selon deux colonnes identiques et juxtaposées de trois électrodes, chaque colonne étant parallèle à l'axe principal (Δ), celles des électrodes de chaque face qui sont situées en quinconce les unes par rapport aux autres dans ladite face étant reliées électriquement entre elles, sélectivement par rapport aux autres électrodes de ladite face, formant ainsi deux groupes d'électrodes sur chaque face de la plaquette, et chaque groupe d'électrodes de chaque face étant relié électriquement, ou adapté pour être relié électriquement, en outre à celui des deux groupes d'électrodes de l'autre face qui est situé en superposition à travers la plaquette.
- [Revendication 8] Oscillateur électromécanique comprenant :
 - une structure (1) conforme à l'une quelconque des revendications précédentes ; et
 - un circuit électronique (2), qui est connecté électriquement à la structure (1) et adapté pour compenser des pertes énergétiques de ladite structure, de sorte que l'oscillateur électromécanique délivre continuellement un signal de sortie basé sur le mode propre de la structure qui comprend la vibration par extension-compression de la poutre principale (10) et les vibrations par flexion des deux poutres latérales (11a, 11b), toutes selon le mode partiel de vibration égal à trois.
- [Revendication 9] Dispositif électronique ou de communication (100), comprenant un circuit d'horloge, ledit circuit d'horloge incorporant un oscillateur électromécanique selon la revendication 8.

[Fig. 1]

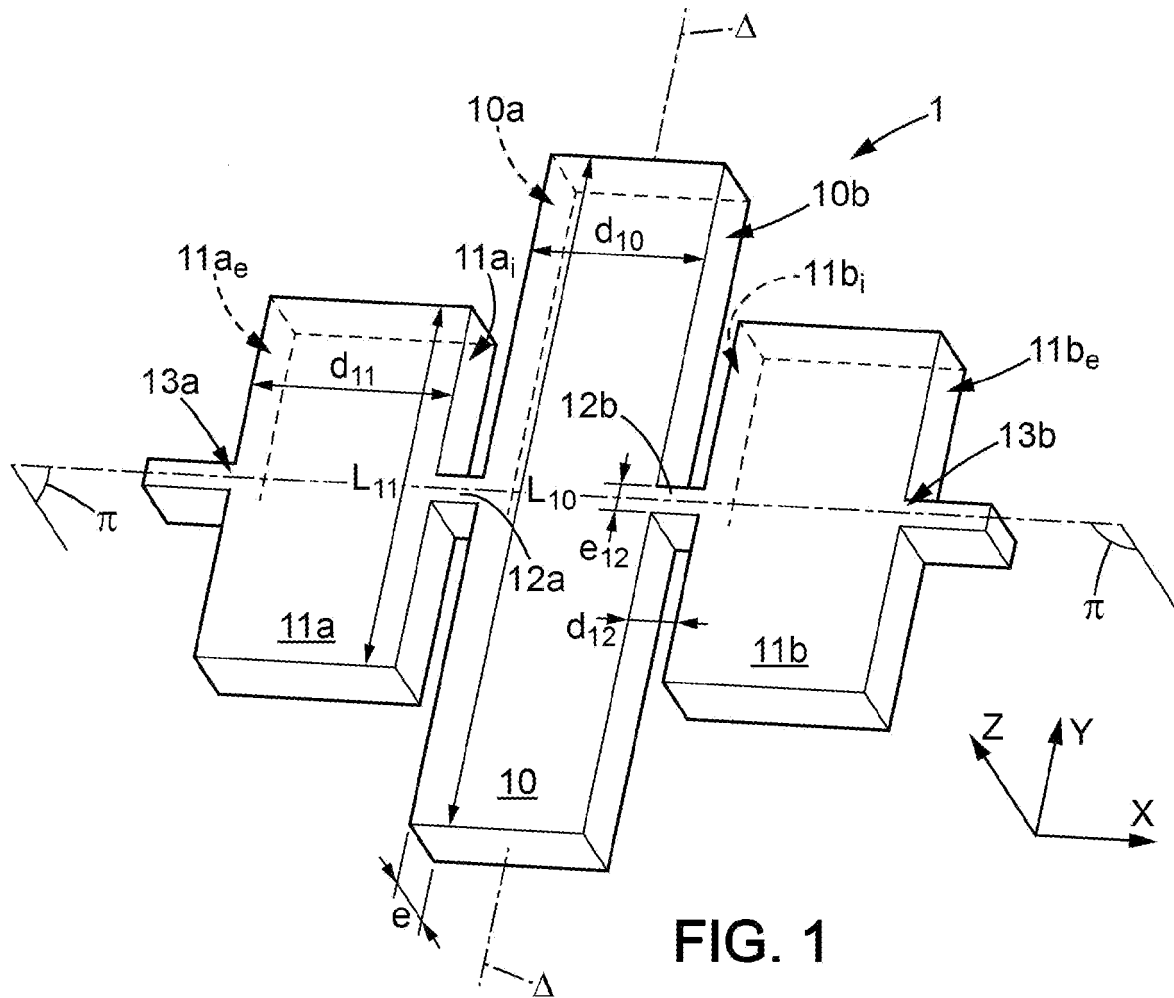


FIG. 1

[Fig. 2a]

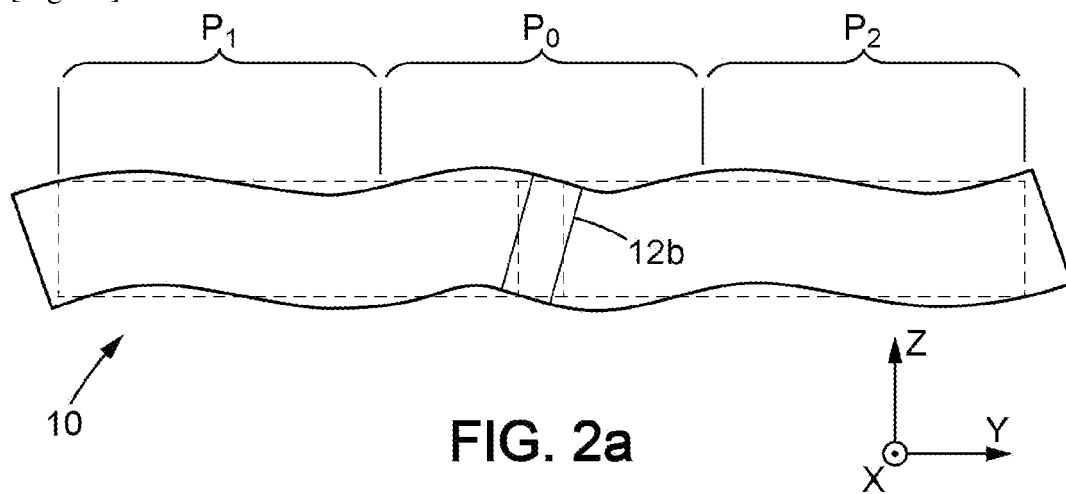


FIG. 2a

[Fig. 2b]

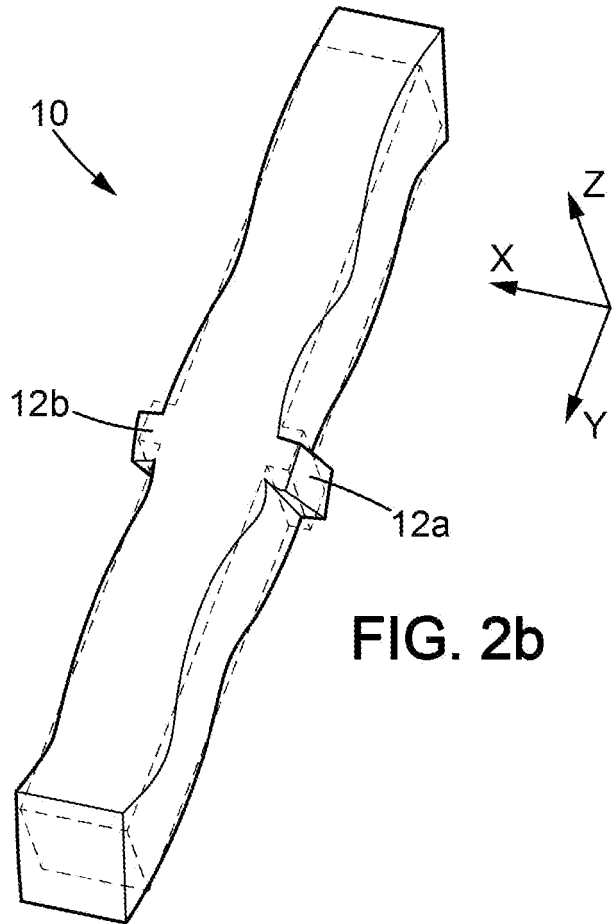


FIG. 2b

[Fig. 2c]

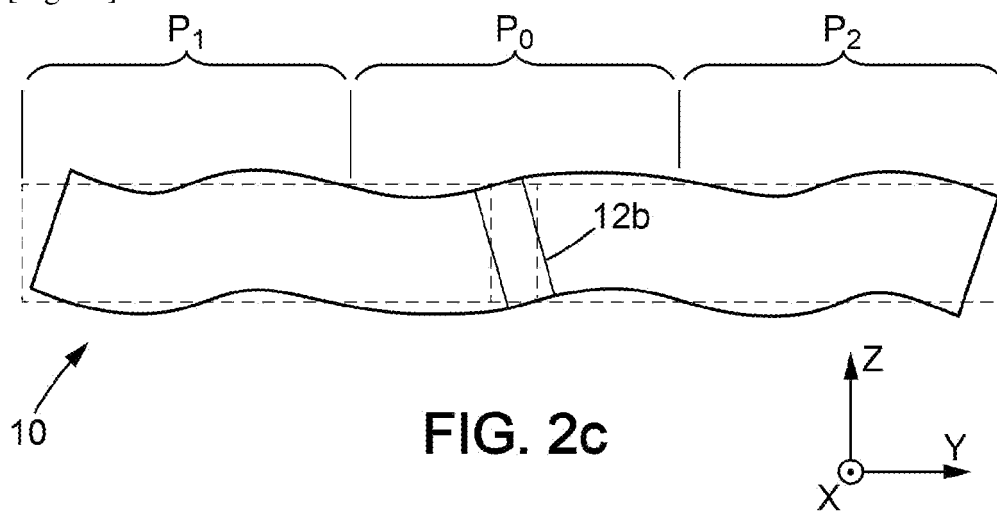


FIG. 2c

[Fig. 2d]

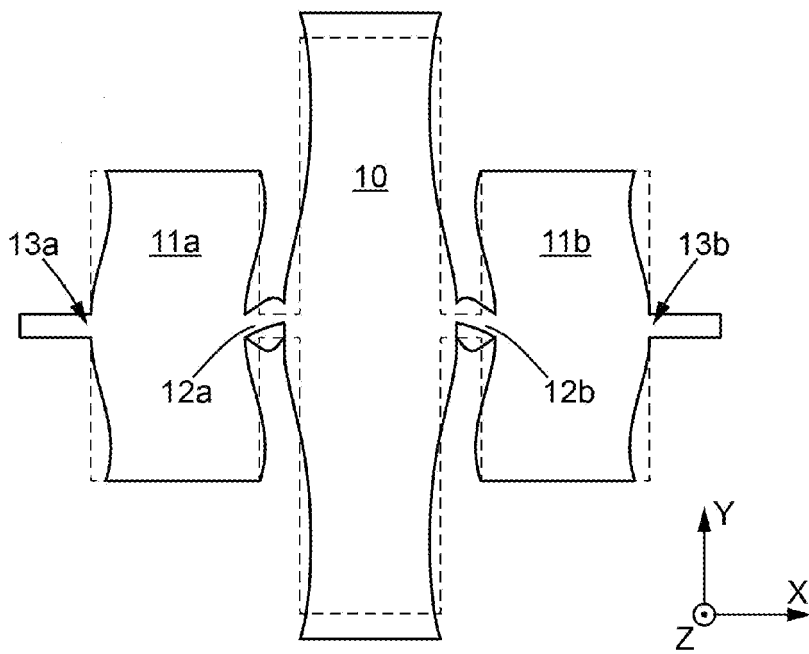


FIG. 2d

[Fig. 2e]

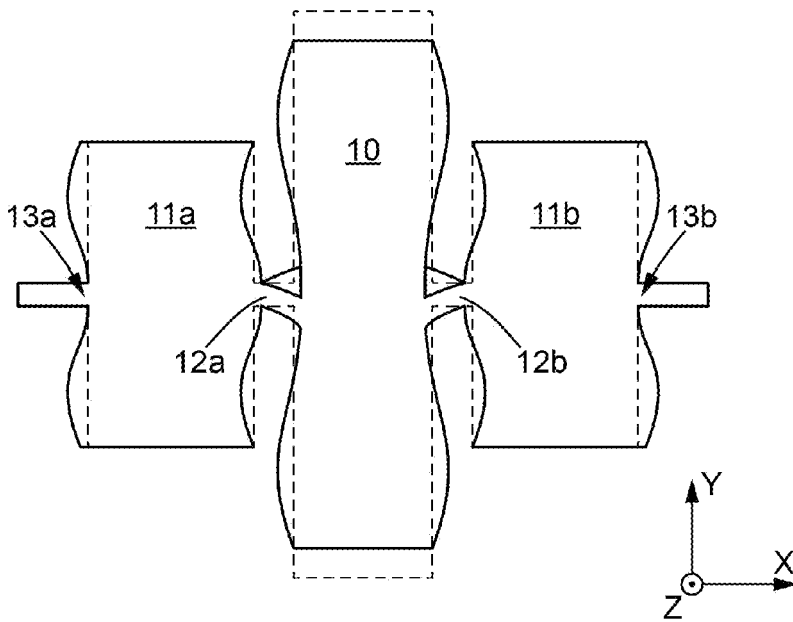


FIG. 2e

[Fig. 3a]

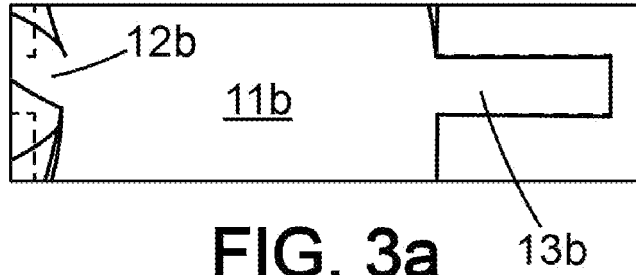
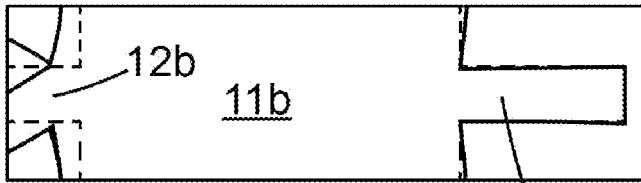
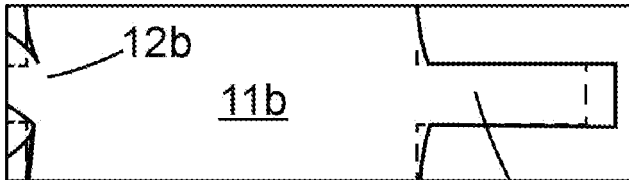


FIG. 3a

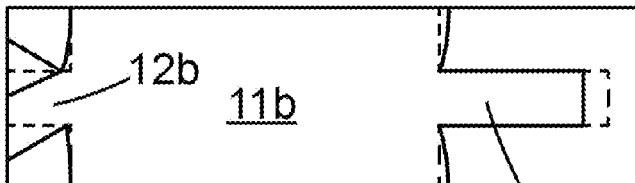
[Fig. 3b]

**FIG. 3b**

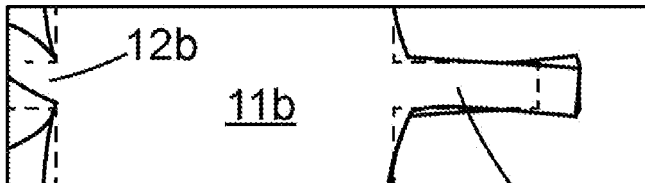
[Fig. 3c]

**FIG. 3c**

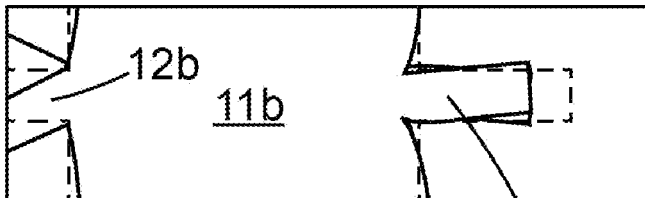
[Fig. 3d]

**FIG. 3d**

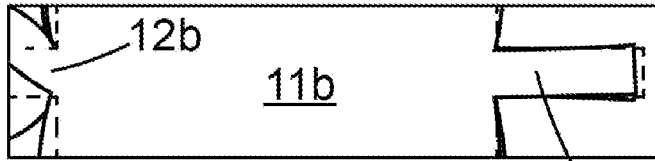
[Fig. 3e]

**FIG. 3e**

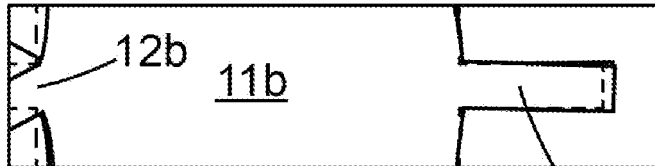
[Fig. 3f]

**FIG. 3f**

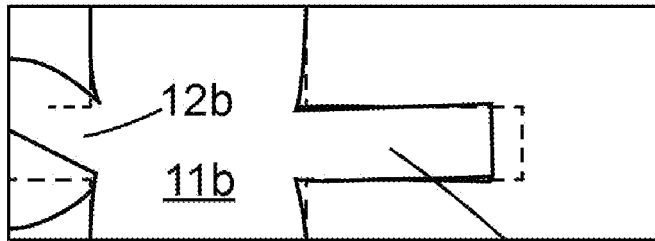
[Fig. 3g]

**FIG. 3g**

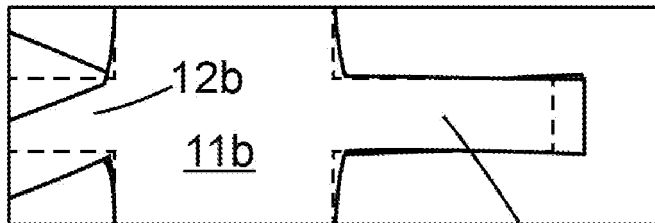
[Fig. 3h]

**FIG. 3h**

[Fig. 3i]

**FIG. 3i**

[Fig. 3j]

**FIG. 3j**

[Fig. 4]

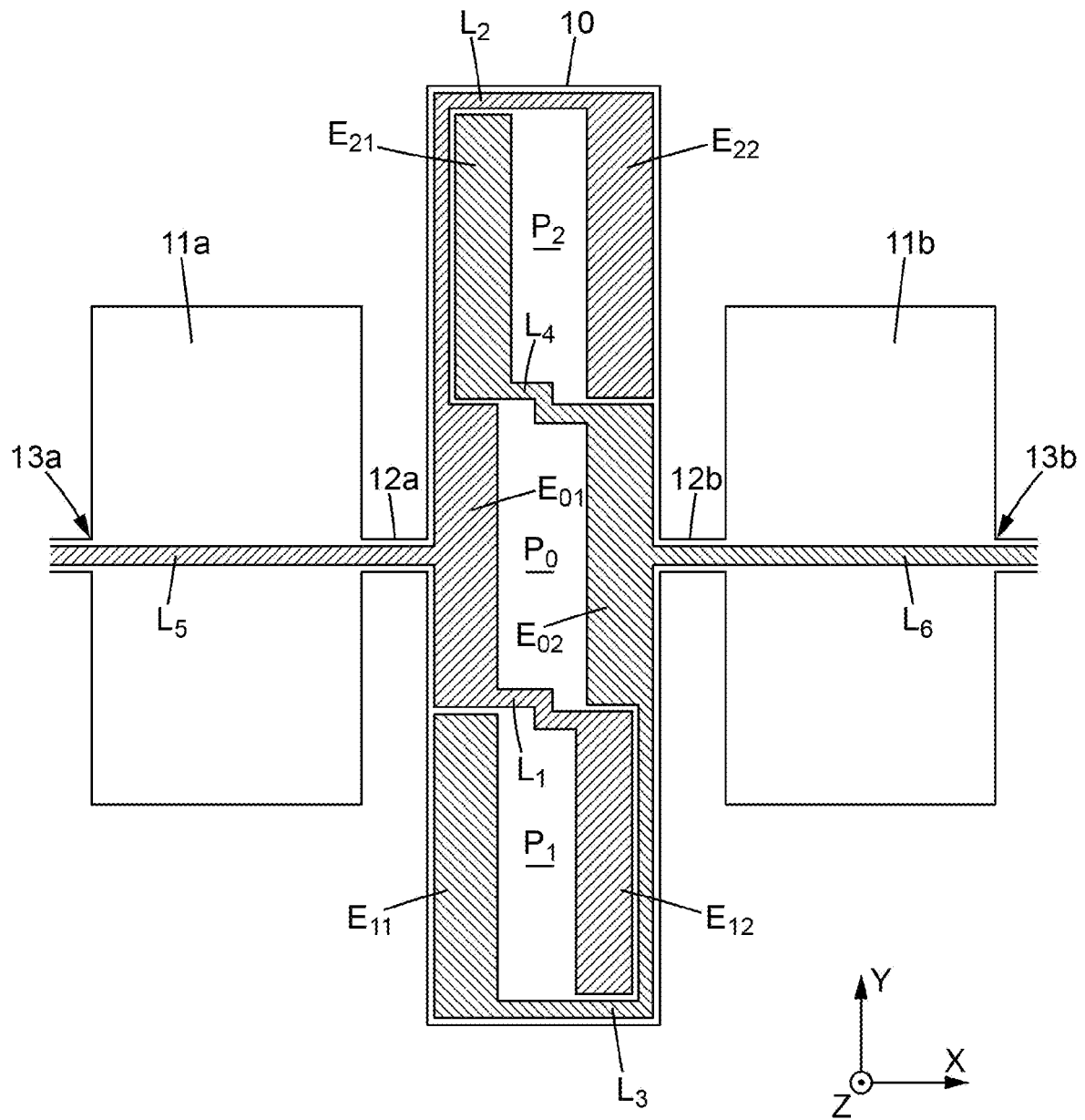


FIG. 4

[Fig. 5]

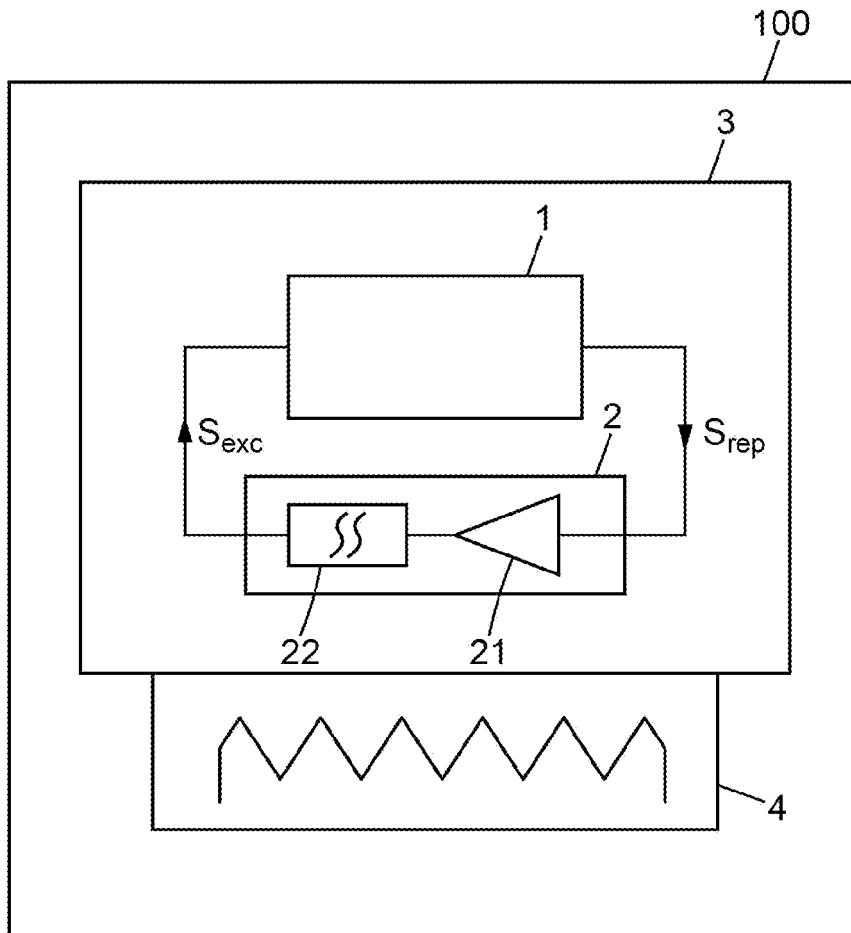


FIG. 5

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

☐ Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

☒ Le demandeur a maintenu les revendications.

☐ Le demandeur a modifié les revendications.

☐ Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

☐ Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

☒ Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

☐ Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

NEANT

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

US 5 627 425 A (KAIDA HIROAKI [JP] ET AL)
6 mai 1997 (1997-05-06)

JP 2004 135357 A (PIEDEKKU GIJUTSU
KENKYUSHO KK) 30 avril 2004 (2004-04-30)

"High Q 2D-length extension mode
resonators for potential time-frequency
applications"
In: P. CHAPELLIER et al.: "Microsystem
Technologies",
14 août 2019 (2019-08-14), Springer,
XP002807433,

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT