



(11)

EP 4 273 632 A1

(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:
08.11.2023 Bulletin 2023/45

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):
G04B 1/14 (2006.01) **G04B 15/14 (2006.01)**
G04B 17/06 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **22172162.4**

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):
G04B 17/066; G04D 7/10

(22) Date de dépôt: **06.05.2022**

(84) Etats contractants désignés:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**
Etats d'extension désignés:
BA ME
Etats de validation désignés:
KH MA MD TN

(72) Inventeurs:
• **GLASSEY, Marc-André**
1967 Bramois (CH)
• **TILLE, Nicolas**
1965 Savière (CH)
• **SOOBBARAYEN, Kevin**
25300 Pontarlier (FR)

(71) Demandeurs:
• **Sigatec SA**
1950 Sion (CH)
• **Richemont International S.A.**
1752 Villars-sur-Glâne (CH)

(74) Mandataire: **BOVARD AG**
Patent- und Markenanwälte
Optingenstrasse 16
3013 Bern (CH)

(54) **PROCÉDÉ DE FABRICATION DE COMPOSANTS HORLOGERS**

(57) La présente invention se rapporte à un procédé de fabrication de composants horlogers (110), dans lequel, dans une plaquette (100) à base de silicium, on forme, selon des dimensions cibles, des composants horlogers (110) ainsi qu'au moins une éprouvette (120) de géométrie différente de celle des composants (110),

on détermine au moins un paramètre de caractérisation de l'éprouvette (120) représentatif d'une caractéristique des composants, et à partir dudit paramètre, on détermine ladite caractéristique des composants et/ou on détermine si une correction dimensionnelle doit être appliquée aux composants (110).

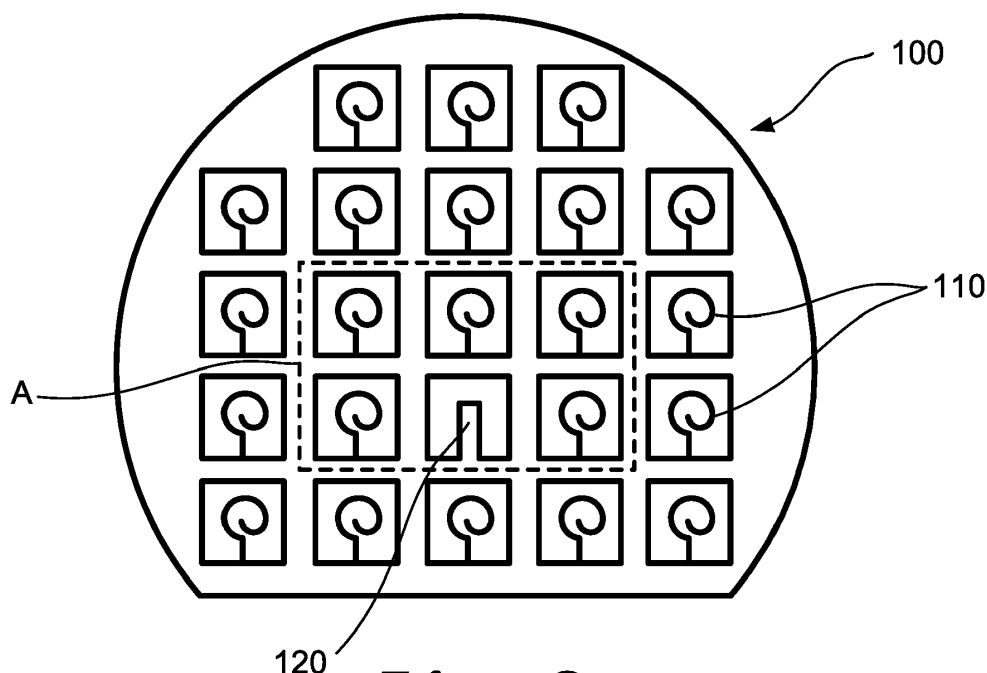


Fig. 3

Description

Domaine technique de l'invention

[0001] La présente invention se rapporte au domaine de la fabrication de composants horlogers, tels que des spiraux horlogers, roues d'échappement, ancrs, etc.

État de la technique

[0002] Un mouvement d'horlogerie est constitué d'une pluralité de composants qui interagissent étroitement les uns avec les autres. Ces composants comprennent par exemple un balancier pivotant et un spiral horloger prévu pour produire un couple de rappel sur le balancier, qui déterminent ensemble la fréquence de référence à partir de laquelle est effectuée la mesure de l'écoulement du temps.

[0003] Pour garantir la précision du mouvement, il est nécessaire de maîtriser précisément les caractéristiques de chacun des composants mis en œuvre. Par exemple, la fréquence de référence précitée dépend directement du moment d'inertie du balancier et de la raideur du spiral, qui doivent donc être parfaitement maîtrisées.

[0004] Il y a quelques années, on a commencé à utiliser de nouveaux matériaux pour la fabrication des composants horlogers, moyennant quoi de nouvelles techniques de fabrication telles que la gravure ionique réactive profonde (encore appelée gravure DRIE qui est l'acronyme de Deep Reaction Ion Etching) ont pu être employées.

[0005] On a toutefois constaté une dispersion géométrique importante entre des composants identiques issus d'un même substrat, et une dispersion encore plus importante entre des composants identiques issus de substrats différents. Cette dispersion, si elle n'est pas maîtrisée, peut impacter la précision du mouvement horloger.

[0006] A titre d'exemple, la figure 1 illustre schématiquement les sections transversales des lames de trois spiraux S1, S2, S3 formés selon des dimensions cibles identiques, sur des substrats P1, P2, P3 différents.

[0007] Les hauteurs h_1 , h_2 , h_3 des lames des spiraux (mesurées dans la direction de la gravure) sont identiques. Mais leurs largeurs l_1 , l_2 , l_3 sont toutes différentes de la largeur cible l_c , et sont, de plus, différentes les unes des autres.

[0008] Or la raideur R_s d'un spiral de section constante dépend de son matériau et de ses dimensions, et est définie par la formule [1] ci-dessous :

$$R_s = \frac{E \times l_s^3 \times h_s}{12 L_s}$$

[0009] Avec

R_s = raideur du spiral

E = module d'élasticité

l_s = largeur de la lame

h_s = hauteur de la lame

L_s = longueur de la lame

[0010] Les écarts dimensionnels entre les spiraux entraînent donc également une dispersion de leur raideur. Cela ressort de la figure 2 qui représente schématiquement, pour chaque lot de spiraux réalisé sur chaque plaquette P1, P2, P3, la dispersion de raideur R qui suit une distribution gaussienne (courbes C1, C2, C3).

[0011] Plusieurs procédés ont été développés ces dernières années dans le but de centrer la moyenne de distribution gaussienne des spiraux sur une valeur de raideur nominale et de réduire l'écart-type de la gaussienne.

[0012] Le document EP 3181938 propose dans ce but de former un spiral selon des dimensions supérieures aux dimensions nécessaires pour l'obtention d'un spiral d'une raideur prédéterminée, en mesurant la raideur de ce spiral en l'accouplant avec un balancier doté d'une inertie prédéterminée, en calculant l'épaisseur de matériau à retirer pour obtenir les dimensions nécessaires pour l'obtention de la raideur souhaitée, et en retirant cette épaisseur du spiral. Cette approche nécessite une grande précision au niveau de la mesure de la fréquence du spiral pour déterminer sa raideur. Par ailleurs, cette mesure de fréquence constitue une opération minutieuse qui nécessite un temps important. Elle entraîne également un risque de pollution des spiraux.

[0013] Le document EP 3 845 770 A1 propose lui d'utiliser un masque corrigé pour la structuration par photolithographie d'une couche de résine photosensible portée par une couche du substrat. Le masque comporte des fenêtres définissant chacune le contour d'un spiral, au moins certaines fenêtres ayant des dimensions différentes de sorte à compenser la dispersion de raideur au sein des spiraux du substrat. Cependant, ce procédé ne s'est pas avéré suffisamment efficace pour centrer les distributions gaussiennes de raideur de substrats différents sur une même raideur nominale.

[0014] Il existe donc toujours un besoin d'améliorer le procédé de fabrication de tels spiraux, notamment de lots de spiraux issus de substrats différents, dans le but de maîtriser leurs caractéristiques et notamment leur raideur, tout en évitant les inconvénients précités.

[0015] Le problème se pose de manière similaire pour la fabrication des autres composants horlogers, notamment les balanciers cités précédemment ou les ancrs ou les roues d'échappement, qui sont soumis aux mêmes effets de dispersion dimensionnelle lors de la fabrication.

Résumé de l'invention

[0016] Un but de la présente invention est de proposer un procédé de fabrication de composants horlogers permettant de répondre aux besoins précités.

[0017] Selon l'invention, ce but est atteint grâce à un procédé de fabrication de composants horlogers, dans

lequel :

- a) dans une plaquette à base de silicium, on forme, selon des dimensions cibles, des composants horlogers ainsi qu'au moins une éprouvette de géométrie cible différente de celle des composants,
- b) on détermine au moins un paramètre de caractérisation de l'éprouvette représentatif d'une caractéristique des composants,
- c) à partir dudit paramètre, on détermine ladite caractéristique des composants et/ou on détermine si une correction dimensionnelle doit être appliquée aux composants.

[0018] Dans le cadre de la présente invention, les composants peuvent être notamment (mais non limitativement) des spiraux horlogers ou des ancras ou des roues d'échappement pour mouvement horloger.

[0019] Les composants horlogers sont généralement fabriqués dans un substrat comprenant une première couche à base de silicium dans laquelle les composants doivent être formés, une deuxième couche appelée « support » également à base de silicium et servant à rigidifier le substrat et, entre ces deux couches, une couche intermédiaire aussi appelée « couche d'arrêt », en oxyde de silicium.

[0020] La formation des composants horlogers est typiquement réalisée par gravure réactive ionique profonde (DRIE) à travers un masque de résine photosensible formé par photolithographie sur la première couche du substrat.

[0021] A l'issue du procédé de formation, les composants ont été découpés dans une plaquette comprenant au moins une portion utile de la première couche du substrat, ladite portion utile étant libérée du support et de la couche d'arrêt.

[0022] Comme expliqué précédemment, il est établi que les procédés d'illumination et de développement de la résine photosensible comme la gravure DRIE entraînent une dispersion dimensionnelle entre des composants issus de différents substrats d'une même série, qui peuvent influencer sur les caractéristiques des composants.

[0023] Le procédé permet de déduire, à partir de la caractérisation d'une structure de test (éprouvette) formée sur la même plaquette qu'une pluralité de composants, au moins une caractéristique de ces composants. Comme alternative ou en complément, le procédé peut également permettre d'identifier une déviation entre les dimensions cibles (celles souhaitées théoriquement) et les dimensions effectives des composants (obtenues à l'issue de la gravure) d'une même plaquette, et le cas échéant éventuellement de quantifier ladite déviation pour permettre une correction ultérieure.

[0024] L'utilisation d'une éprouvette dont la géométrie et les dimensions peuvent être choisies et adaptées selon les besoins permet de systématiser les mesures de caractérisation, qui peuvent en outre être rapides et simples. La rapidité et la reproductibilité du procédé de fa-

brication sont améliorés, nonobstant les variations de géométrie des composants à fabriquer d'une série à l'autre.

[0025] Le contact avec les composants à fabriquer est par ailleurs évité, éliminant les risques de pollution ou d'endommagement de ces derniers.

[0026] En permettant de mieux caractériser les pièces fabriquées, le procédé permet en outre, in fine, d'optimiser l'appairage entre les différents composants du mouvement horloger et d'améliorer la précision de ce dernier.

[0027] Dans le cadre de la présente invention, une éprouvette est entendue comme tout élément, réalisé dans la même plaquette que les composants à fabriquer, et présentant une géométrie cible (i.e. géométrie de référence) différente de la géométrie cible des dits composants.

[0028] Par dimension(s) ou respectivement géométrie cible d'une éprouvette ou d'un composant, on entend ici sa ou ses dimension(s) ou respectivement sa géométrie vue en projection orthogonale dans le plan général de la plaquette (i.e. en projection selon la direction de la hauteur ou plus petite dimension de la plaquette) et telle que ciblée lors de la fabrication. Par dimension ou géométrie ciblée lors de la fabrication, on entend une dimension ou géométrie que l'on souhaite obtenir après gravure, pour lesdits composants, sans tenir compte d'éventuelles divergences mineures résultant du procédé de fabrication et notamment de l'opération de gravure.

[0029] De la même façon, dans la présente demande, et sauf indication contraire, une forme d'un élément se réfère à ladite géométrie cible

[0030] De plus, dans la présente demande, une largeur est toujours mesurée en projection dans le plan de la plaquette. Une hauteur est mesurée orthogonalement au plan général de la plaquette.

[0031] Enfin, dans la présente demande, une section d'un élément est une section transversale dudit élément dans un plan orthogonal au plan général de la plaquette.

[0032] Dans certains cas, la géométrie cible des composants peut être volontairement choisie différente d'une géométrie théorique permettant d'obtenir les caractéristiques finales souhaitées pour lesdits composants. Par exemple, les dimensions cibles, et notamment la largeur cible, peuvent être choisies supérieures aux dimensions théoriques, et notamment à la largeur théorique, permettant d'obtenir les caractéristiques finales souhaitées pour les composants. Par exemple, des spiraux peuvent être formés sur une plaquette en visant des dimensions cibles supérieures à celles permettant théoriquement d'obtenir la valeur de raideur finale souhaitée, pour permettre un ajustement subséquent par retrait de matière.

[0033] La géométrie effective à l'issue de la gravure diverge généralement de cette géométrie cible du fait des variations du procédé.

[0034] Pour le reste, l'éprouvette a une hauteur identique à celle des composants fabriqués et est constituée du même matériau. Elle peut même parfois avoir une section identique à celle des composants, si sa largeur

cible est la même.

[0035] Une éprouvette utilisée dans le cadre de la présente invention est un élément sacrificiel, qui sert exclusivement à la caractérisation des composants à fabriquer et n'est pas destiné à être utilisé dans un mécanisme horloger.

[0036] Selon un premier mode, l'éprouvette ne présente pas la même forme générale que les composants à fabriquer. Dans un cas où les composants à fabriquer sont des spiraux, des ancrs ou des roues, l'éprouvette peut par exemple présenter une forme de poutre ou lame droite.

[0037] Selon un deuxième mode, l'éprouvette peut aussi présenter la même forme générale que les composants à fabriquer, mais avec toujours une géométrie cible différente de celle des dits composants. Par exemple, dans le cas où les composants à fabriquer sont des spiraux, au moins une éprouvette peut être un spiral de référence de géométrie cible différente des spiraux à fabriquer.

[0038] Une géométrie différente sera par exemple caractérisée par une ligne générale/médiane différente (par exemple une courbure différente, un nombre de spires différent, un nombre de dents différent, etc...) et/ou des dimensions différentes et/ou un profil externe différent (par exemple un profil de flancs différent).

[0039] Une unique éprouvette peut être formée sur la plaquette. Comme alternative, une pluralité d'éprouvettes peut être formée dans la plaquette, et l'étape b) peut dans ce cas comprendre le calcul d'une moyenne d'au moins un paramètre sur la pluralité d'éprouvettes.

[0040] Selon un exemple avantageux, au moins une éprouvette peut être une lame s'étendant selon une direction rectiligne, en particulier entre ses deux extrémités dont au moins l'une est fixée à la plaquette et l'autre peut ou non être libre.

[0041] La lame peut comporter au moins une portion de section constante, et en particulier elle peut être de section constante sur toute sa longueur. La lame peut aussi comporter une portion de section agrandie à son extrémité distale.

[0042] A l'étape b), l'éprouvette peut être caractérisée directement sur la plaquette. Dans ce cas, l'ouverture pratiquée dans la plaquette autour de l'éprouvette peut avantageusement être choisie suffisamment large pour permettre de la déformer dans le plan de la plaquette.

[0043] Comme variante moins avantageuse, l'éprouvette peut être caractérisée après avoir été détachée préalablement de la plaquette et fixée sur un support de test.

[0044] L'étape b) comprend par exemple la détermination d'un paramètre de caractérisation de l'éprouvette parmi :

- une dimension de l'éprouvette, notamment sa largeur,
- une valeur de déformation de l'éprouvette,
- une vitesse ou une accélération de déplacement de

l'éprouvette,

- une fréquence propre de vibration de l'éprouvette,
- une ou plusieurs fréquence(s) de résonance de l'éprouvette,
- une raideur effective de l'éprouvette,

ou une pluralité de ces paramètres.

[0045] Dans la présente demande, la fréquence propre d'un système est la fréquence à laquelle oscille ce système lorsqu'il est en évolution libre, c'est-à-dire sans force excitatrice. Une fréquence de résonance d'un système soumis à une force excitatrice est une fréquence à laquelle on peut mesurer un maximum local d'amplitude de déplacement pour un point donné du système.

[0046] Un paramètre de caractérisation peut être mesuré directement ou peut être obtenu par déduction d'un autre paramètre mesuré préalablement.

[0047] L'étape b) peut en particulier comprendre une mesure et/ou une détermination d'une fréquence, notamment une fréquence propre ou une ou plusieurs fréquences de résonance, et/ou d'une amplitude et/ou d'une vitesse et/ou d'une accélération de déplacement d'au moins un point de l'éprouvette.

[0048] De façon particulièrement avantageuse, l'éprouvette est définie dans un plan de base correspondant au plan général de la plaquette lors de sa formation, et le déplacement est selon une direction contenue dans ledit plan de base. Le plan de déplacement de l'éprouvette pendant la caractérisation coïncide alors avec le plan de déplacement des composants en fonctionnement, ce qui rend la caractérisation plus précise, plus directe. Le paramètre de caractérisation exprime les propriétés notamment mécaniques et/ou géométriques de l'éprouvette et des composants avec la même pondération de la ou des différentes valeurs prises en compte.

[0049] Selon un exemple, à l'étape b), on applique à l'éprouvette une excitation vibratoire, et on détermine au moins une caractéristique vibratoire de l'éprouvette lors de la vibration.

[0050] Par excitation vibratoire on entend ici toute excitation permettant de mettre l'éprouvette en vibration.

[0051] Selon un exemple, l'excitation vibratoire est entretenue.

[0052] Selon un autre exemple, l'excitation vibratoire est ponctuelle et non entretenue.

[0053] Avantageusement, l'excitation vibratoire est variable (ou modifiée) au cours du temps. Autrement dit, l'excitation vibratoire comprend l'excitation de l'éprouvette à des fréquences différentes au cours du temps. On peut par exemple procéder à plusieurs phases d'excitation successives, l'éprouvette étant excitée à une fréquence donnée (excitation mono-fréquentielle entretenue) au cours de chaque phase d'excitation.

[0054] Dans ce cas on peut identifier au moins une caractéristique de résonance de l'éprouvette au cours de la vibration, par exemple une fréquence de résonance ou un pic de résonance.

[0055] Avantageusement, l'excitation vibratoire cou-

vre une plage de fréquences prédéterminée, de préférence située au voisinage de la fréquence de résonance.

[0056] L'excitation vibratoire peut être imposée par une source de vibrations acoustiques, par exemple une source piézo-électrique.

[0057] Comme alternative, l'excitation peut être imposée par une source d'excitation mécanique.

[0058] Selon un exemple, l'excitation vibratoire est une excitation impulsionnelle par exemple produite par un choc appliqué directement sur l'éprouvette ou sur un élément solidaire de l'éprouvette au moment de l'excitation, par exemple sur la plaquette lorsque l'éprouvette est encore solidaire de ladite plaquette. Une telle impulsion ou choc peut par exemple être induite à l'aide d'un marteau d'excitation.

[0059] Selon un autre exemple, l'éprouvette pourrait être chargée par une force d'extrémité pour être déformée, puis être relâchée.

[0060] La caractéristique vibratoire de l'éprouvette déterminée lors de l'excitation ou après excitation peut par exemple être une caractéristique d'une fréquence propre ou d'une fréquence de résonance de l'éprouvette ou elle peut être une vitesse ou une accélération ou une amplitude de déplacement permettant éventuellement de déduire une fréquence propre ou une caractéristique d'une fréquence de résonance de l'éprouvette.

[0061] Selon un autre exemple, à l'étape b), on applique à l'éprouvette une force de flexion prédéterminée et on identifie au moins une amplitude de déplacement de l'éprouvette sous l'effet de ladite force de flexion.

[0062] Selon encore un autre exemple de caractérisation, l'étape b) comprend une mesure d'au moins une dimension de l'éprouvette (par exemple sa largeur), notamment une mesure optique, notamment une mesure au laser.

[0063] Selon encore un autre exemple, l'étape b) comprend la mesure d'une raideur d'au moins une éprouvette se présentant sous la forme d'un spiral de référence.

[0064] Une caractéristique des composants pouvant être déduite d'un paramètre de caractérisation de l'éprouvette déterminé par exemple selon l'une des méthodes précitées peut être en particulier :

- une dimension critique des composants, ou
- une propriété mécanique des composants, par exemple une raideur ou une inertie, ou encore
- une caractéristique liée au fonctionnement futur des composants, autrement dit une caractéristique représentative de la manière dont lesdits composants interagiront avec d'autres composants de mouvement horloger dans leur mouvement, notamment un rendement ou une fréquence ou une amplitude de mouvement (à iso paramètres).

[0065] Par dimension critique, on entend par exemple une cote, une inclinaison (notamment une inclinaison de flancs), un rayon de courbure.

[0066] Le procédé permet en particulier de caractériser des dimensions difficiles à mesurer optiquement, notamment des dimensions difficilement accessibles aux systèmes de mesure optique.

ser des dimensions difficiles à mesurer optiquement, notamment des dimensions difficilement accessibles aux systèmes de mesure optique.

[0067] Selon un exemple, à l'étape c) on détermine si une correction dimensionnelle doit être appliquée aux composants. Le procédé selon l'invention permet en effet de détecter l'erreur dimensionnelle liée à la photolithographie et à la gravure DRIE grâce à la ou aux éprouvette(s) prévue(s) sur chaque plaquette.

[0068] Par exemple, le procédé peut comporter une étape de comparaison du paramètre de caractérisation de l'éprouvette ou de la caractéristique correspondante des composants avec une valeur de référence, pour en déduire la nécessité d'une correction dimensionnelle.

[0069] Une caractéristique des composants et/ou la nécessité d'une correction dimensionnelle des composants peut par exemple être déduite du ou des paramètres de caractérisation de l'éprouvette

- au moyen d'un modèle prédictif, par exemple mettant en œuvre un algorithme d'apprentissage automatique ou une formule polynomiale, et/ou
- par le biais d'une table de correspondance.

[0070] Selon une disposition de l'invention, à l'étape c) on détermine en outre une valeur de correction dimensionnelle à appliquer aux composants.

[0071] Autrement dit, le procédé permet non seulement d'identifier l'erreur dimensionnelle, mais également de quantifier la valeur de correction dimensionnelle à appliquer.

[0072] La valeur de correction dimensionnelle correspond typiquement à une épaisseur de matière à retirer sur les composants pour obtenir la dimension souhaitée.

Dans ce cas, les composants sont initialement fabriqués à des dimensions cibles, notamment une largeur cible, plus larges que les dimensions théoriques, notamment la largeur théorique, permettant d'obtenir la raideur souhaitée.

[0073] La correction est habituellement - bien que non nécessairement - appliquée sur chaque face latérale d'un composant (par exemple pour faire varier sa largeur) et généralement aussi sur ses faces supérieure et inférieure (pour faire varier sa hauteur). Très souvent, la correction consiste plus globalement en une diminution de toute l'épaisseur de la plaquette (sur l'ensemble de ses surfaces), incluant les composants et la ou les éprouvettes.

[0074] La valeur de correction dimensionnelle peut également être déterminée par un modèle prédictif, par exemple mettant en œuvre un algorithme d'apprentissage automatique ou une formule polynomiale.

[0075] Comme variante, la détermination de la valeur de correction dimensionnelle est réalisée par le biais d'une table de correspondance.

[0076] Selon un exemple, le procédé comprend en outre une étape d) au cours de laquelle on corrige effectivement les dimensions des composants selon la valeur de correction déterminée à l'étape c).

[0077] L'étape d) comprend avantageusement au moins une étape d'oxydation et une étape de désoxydation des composants.

[0078] Selon un exemple particulier, plusieurs ou tous les composants horlogers peuvent être soumis à une oxydation thermique préalablement à l'étape b). Dans ce cas, l'étape de correction dimensionnelle d) peut comprendre au moins une étape de désoxydation partielle et une étape de réoxydation des composants.

[0079] Selon une disposition particulière, l'étape a) comprend au moins les sous-étapes suivantes :

- a1) fournir un substrat comprenant une première couche à base de silicium, une deuxième couche à base de silicium et une couche intermédiaire à base d'oxyde de silicium,
- a2) recouvrir la première couche d'une couche de résine photosensible,
- a3) par photolithographie, former dans ladite couche de résine des ouvertures correspondant aux contours hors attache des composants horlogers et de la au moins une éprouvette,
- a4) graver la première couche sur toute sa hauteur sous lesdites ouvertures pour former les composants horlogers et la au moins une éprouvette.

[0080] Par contour hors attache d'une pièce on entend ici le contour de la pièce à l'exception d'une portion de son contour externe destinée à former une attache la maintenant au reste du substrat/de la plaquette.

[0081] La sous-étape a3 peut, en particulier, comprendre les étapes suivantes :

- a31) exposer la couche de résine photosensible à l'aide d'une source lumineuse, à travers un masque photolithographique muni de fenêtres définissant les contours hors attache des composants horlogers et de l'éprouvette,
- a32) éliminer localement la résine photosensible au moyen d'un solvant pour former les ouvertures.

[0082] Selon une disposition avantageuse, le masque photolithographique est un masque corrigé, au moins certaines fenêtres du masque étant de dimensions différentes de sorte à réduire l'étendue d'une dispersion dimensionnelle entre au moins une partie des composants horlogers.

Breve description des dessins

[0083] Les particularités et les avantages de la présente invention apparaîtront avec plus de détails dans le cadre de la description faite ci-après d'exemples de réalisation donnés à titre illustratif et non limitatif en référence aux dessins ci-annexés sur lesquels :

- La figure 1 illustre les sections des lames de trois spiraux formés, selon des dimensions cibles identi-

ques, sur des plaquettes différentes,

- La figure 2 illustre la dispersion de raideurs de spiraux d'une même série, formés sur trois plaquettes différentes
- La figure 3 représente une plaquette dans laquelle ont été formés une pluralité de spiraux horlogers et une éprouvette,
- La figure 4 est une vue agrandie du détail A de la figure 3,
- Les figure 5A à 5D sont des vues schématiques et partielles illustrant le procédé de fabrication de la plaquette de la figure 3,
- Les figures 6 à 9 illustrent quatre autres exemples d'éprouvettes pouvant être utilisées dans le procédé de l'invention,
- La figure 10 illustre une méthode de caractérisation d'une éprouvette,
- La figure 11 illustre une deuxième méthode de caractérisation d'une éprouvette,
- La figure 12 illustre une troisième méthode de caractérisation d'une éprouvette,
- La figure 13 illustre une table de correspondance pouvant être utilisée pour la détermination de la valeur de correction dimensionnelle.
- Les figures 14A à 14C illustrent la correction dimensionnelle d'un spiral selon un mode de mise en œuvre de l'invention,
- La figure 15 illustre une variante de découpe d'une éprouvette dans un substrat en silicium.

Description détaillée

[0084] L'invention est illustrée dans la suite par des exemples relatifs à la fabrication de spiraux. Les mêmes principes sont cependant applicables à tout autre type de composants horlogers.

[0085] La figure 3 représente en vue de dessus une plaquette 100 à base de silicium dans laquelle plusieurs spiraux horlogers 110 ont été formés avec une même géométrie cible et dans laquelle une éprouvette 120 formant structure de test a en outre été formée avec une géométrie cible différente de celle des composants. La géométrie cible des composants est la géométrie que l'on vise à obtenir à l'issue de la gravure et avant correction dimensionnelle éventuelle ultérieure. Elle peut être identique à ou différente d'une géométrie théorique qui permettrait d'atteindre les caractéristiques souhaitées

pour les spiraux, notamment une raideur déterminée. La géométrie effective à l'issue de la gravure peut être légèrement différente de cette géométrie cible du fait des variations du procédé et notamment de la dispersion géométrique au sein de la plaquette.

[0086] Une telle plaquette 100 peut être réalisée en mettant en œuvre les étapes de procédé suivantes, illustrées sur les figures 5A à 5D :

On fournit un substrat 10, typiquement un substrat de type silicium sur isolant (SOI), qui comprend une première couche de silicium 11 dans laquelle les spiraux doivent être formés, une deuxième couche de silicium 12 et, entre les deux, une couche intermédiaire ou couche d'arrêt 13 d'oxyde de silicium. Le silicium des première et/ou deuxième couches 11, 12 peut être polycristallin mais il est de préférence monocristallin. Il peut ne pas être dopé ou être dopé, par exemple être dopé au phosphore. Le silicium dopé, électriquement conducteur, est plus stable dimensionnellement et de meilleure résistance mécanique. De préférence, le substrat 10 est fait de silicium qui est d'orientation {1,1,1} et/ou qui est dopé, avantageusement de manière à posséder une résistivité inférieure ou égale à $0,1 \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$, par exemple une résistivité égale à $0,05 \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$.

[0087] On dépose une couche de résine photosensible 20 sur la première couche 11 du substrat 10.

[0088] A travers un masque photolithographique 30 muni de fenêtres 31 de formes correspondant aux contours des spiraux 110 et de l'éprouvette 120, on expose la couche de résine 20 au rayonnement lumineux R d'une source lumineuse (non illustrée). Le rayonnement R peut notamment être un rayonnement comprenant des UV, c'est-à-dire des ultra-violets, voire être constitué d'UV.

[0089] Selon une disposition avantageuse, le masque photolithographique 30 est un masque corrigé selon l'enseignement du document EP 3 845 770 A1, au moins certaines fenêtres 31 du masque étant de dimensions différentes de sorte à viser pour tous les composants la même géométrie cible, en compensant la dispersion de raideur au sein du substrat.

[0090] On élimine ensuite localement la résine photosensible irradiée en la solubilisant dans un bain chimique approprié, pour former des ouvertures 21 correspondant aux contours souhaités des spiraux et de l'éprouvette. On dit que la résine est « développée » : dans le cas d'une résine positive telle qu'illustrée, c'est la portion de la résine exposée au rayonnement R de la source lumineuse qui est retirée. La résine photosensible qui n'a pas été irradiée et transformée par le rayonnement R résiste au bain chimique, reste ainsi en place sur le substrat et forme un masque sacrificiel.

[0091] Dans une variante de mise en œuvre avec une résine dite négative, la résine photosensible est choisie de manière que son irradiation par un rayonnement analogue ou identique au rayonnement R rende cette résine non soluble dans un bain chimique approprié, auquel cas le masque est transformé en conséquence.

[0092] Le silicium de la première couche 11, qui n'est

plus protégé, est ensuite gravé sur toute sa hauteur à travers les ouvertures 21 de la résine, selon une direction perpendiculaire au plan général du substrat 10 (figure 5C). Plusieurs spiraux horlogers 110 ainsi que la ou les éprouvettes 120 sont découpés collectivement, ensemble et en même temps, tous dans la première couche 11.

[0093] La gravure est une gravure ionique réactive profonde, encore appelée gravure DRIE (acronyme de « deep reaction ion etching », qui est la désignation anglaise de la gravure ionique réactive profonde) ou gravure selon le procédé Bosch. Derrière le masque, la première couche 11 n'est pas gravée. Par ailleurs, la couche d'arrêt 13 est moins sensible à la gravure qui ne l'entame donc pas ou dans une très moindre mesure.

[0094] L'inclinaison des flancs de gravure dépendant de la largeur de la surface gravée, il est préférable, pour assurer une correspondance entre l'inclinaison des flancs de l'éprouvette et celle des flancs des composants, que la largeur d'un liseré de gravure autour de l'éprouvette soit sensiblement égale à la largeur des liserés de gravure autour des composants. La largeur des ouvertures 21 de la résine sont donc configurées en conséquence.

[0095] Selon un mode de mise en œuvre possible, on peut, pour chaque composant comme pour l'éprouvette, graver à la fois un liseré de gravure correspondant au profil externe de l'élément et un liseré périphérique autour de ce liseré externe. Lors de la libération de la plaquette, la portion située entre le liseré externe et le liseré périphérique est désolidarisée, libérant autour de l'élément un espace vide 130 tel qu'illustré sur la figure 4, permettant de mouvoir l'élément autour de son attache pour briser cette dernière.

[0096] Comme variante, on pourrait aussi, comme sur la figure 15, graver un unique liseré de gravure externe 130' délimitant l'éprouvette, ledit liseré ayant une largeur sensiblement identique à la largeur des liserés de gravure délimitant les composants.

[0097] Dans une nouvelle étape, le support 12 et la couche d'arrêt 13 sont ensuite retirés localement, ou supprimés totalement, par gravure chimique, de manière que soit libérée la plaquette 100 portant les spiraux horloger illustrée sur la figure 1 (figure 5D).

[0098] Par plaquette on entend généralement dans la présente demande toute structure à base de silicium comportant une portion utile (le cas échéant libérée du support et de la couche intermédiaire du substrat dont elle est issue) dans laquelle sont découpés les composants à fabriquer et au moins une éprouvette de géométrie cible différente de celle des spiraux.

[0099] La plaquette porte finalement les spiraux horlogers 110 et l'éprouvette 120, si bien qu'on peut facilement déplacer ceux-ci ensemble et les traiter collectivement et en même temps. Comme illustré sur la figure 3, l'éprouvette 120 peut par exemple être réalisée dans la portion utile de la plaquette 100 où sont réalisés les spiraux 110 et être entourée de spiraux. Comme variante, l'éprouvette 120 pourrait toutefois être disposée indiffé-

remment en tout endroit de la plaquette 100.

[0100] L'éprouvette 120 de la figure 3 apparaît plus en détail sur la vue agrandie de la figure 4. Dans cet exemple, l'éprouvette 120 est reliée au reste de la plaquette 100 par une extrémité proximale 121 et est libre à son extrémité distale 122. L'ouverture 130 pratiquée dans la plaquette 100 autour de l'éprouvette 120 permet le cas échéant de la déformer dans le plan de la plaquette 100.

[0101] Dans l'exemple de la figure 3, l'éprouvette 120 est une lame s'étendant de façon rectiligne, selon une direction principale Z, entre l'extrémité proximale 121 et l'extrémité distale 122. Ici, la lame présente une section rectangulaire constante et en particulier une largeur l_t constante, sur toute sa longueur L_t mesurée dans sa direction principale Z. Ce mode de réalisation n'est cependant pas limitatif et la figure 6 illustre un autre exemple dans lequel la lame 120 présente une section variable le long de sa direction principale rectiligne Z et se termine, à son extrémité distale 122, par une portion 123 de section localement agrandie formant masse. Selon encore un autre exemple illustré sur la figure 7, l'éprouvette peut se présenter sous la forme d'une lame, par exemple de section constante comme sur la figure 3, mais fixée au reste de la plaquette à ses deux extrémités. Selon encore un autre exemple illustré sur la figure 8, l'éprouvette 120 peut être un spiral de profil différent de celui des spiraux à fabriquer 110, de section constante ou non sur toute sa longueur L_t mesurée entre son extrémité proximale 121 attachée à la plaquette et son extrémité distale libre 122.

[0102] Ces exemples sont donnés à titre illustratif et non exhaustif. Toute autre géométrie adaptée, différente de celle des spiraux à fabriquer, peut être envisagée pour la ou les éprouvettes.

[0103] Les procédés d'illumination et de développement de la résine photosensible, de même que la gravure DRIE, entraînent des écarts dimensionnels entre les largeurs l d'éléments censés être identiques sur des plaquettes différentes.

[0104] Comme expliqué précédemment, on s'intéresse, dans le domaine des spiraux, à compenser cette dispersion dimensionnelle pour faire tendre la moyenne de raideur des spiraux d'une même plaquette vers une valeur nominale.

[0105] Le procédé selon l'invention permet de détecter l'erreur dimensionnelle liée à la gravure grâce à la caractérisation de la ou des éprouvette(s) et de quantifier la valeur de correction dimensionnelle à appliquer aux spiraux pour atteindre la raideur moyenne souhaitée. Dans le contexte des spiraux, on entend par valeur de correction dimensionnelle l'épaisseur e de matière à retirer sur chaque spiral 110 pour aboutir à cette raideur.

[0106] La caractérisation étant réalisée indirectement, via l'éprouvette, les spiraux sont préservés. Par ailleurs, l'éprouvette 120 pouvant prendre des géométries très variées comme évoqué précédemment, les méthodes de caractérisation peuvent être très diverses, et certaines d'entre elles sont décrites dans la suite à titre d'exemples

non limitatifs.

[0107] Dans ces exemples, l'éprouvette 120 est caractérisée directement sur la plaquette 100. Autrement dit, au moins un paramètre de l'éprouvette 120, représentatif de l'écart entre les dimensions effectives des spiraux et leur dimension cible ou une dimension théorique permettant d'obtenir la raideur souhaitée, est déterminé alors que l'éprouvette est toujours attachée à la plaquette 100.

[0108] Comme alternative, l'éprouvette 120 peut aussi être caractérisée après avoir été détachée préalablement de la plaquette 100 et fixée sur un support de test. Dans ce cas, comme illustré sur la figure 9, l'éprouvette 120 est solidaire de la plaquette 100 via une ou plusieurs languettes de détachement 140. Une telle languette de détachement 140 présente avantageusement une portion de jonction de section rétrécie 141 à son extrémité située au voisinage de l'éprouvette 120. La portion de jonction 141, facilement rompable, permet un détachement aisé de l'éprouvette 120. Lorsqu'elle doit être caractérisée sur un support de test, l'éprouvette 120 est avantageusement liée, à au moins l'une de ses extrémités, à une base de fixation 124, de préférence de plus grande largeur que l'éprouvette elle-même, pour sa fixation au support. Dans ce cas, la base de fixation 124 forme avec l'éprouvette un ensemble 125 détachable de la plaquette. La base de fixation 124 est de préférence située entre la languette de détachement 140 et l'éprouvette 120.

[0109] Selon un premier mode de caractérisation, l'éprouvette 120 est soumise à une excitation vibratoire, et une réponse vibratoire de l'éprouvette est mesurée pour en déduire un paramètre de caractérisation tel qu'une fréquence de résonance.

[0110] Dans l'exemple illustré sur la figure 10, on utilise une source piézo-électrique 300 ou toute autre source adaptée pour induire sur l'éprouvette 120 une excitation acoustique dans une plage fréquentielle d'excitation choisie de sorte à inclure au moins une fréquence de résonance de l'éprouvette. En couvrant ou balayant une large plage de fréquences, on peut mesurer plusieurs pics de résonance (ou fréquences de résonance), ce qui peut apporter une meilleure précision.

[0111] On applique par exemple une ou plusieurs fréquences à la fois, que l'on fait varier au cours du temps, au voisinage d'une ou de fréquences de résonance.

[0112] L'excitation est de préférence entretenue pendant une durée suffisante pour en déduire des spectres vibratoires de l'éprouvette.

[0113] Durant l'excitation, on peut par exemple enregistrer, via un moyen de mesure optique adapté 310 tel qu'un vibromètre laser par effet doppler, une amplitude ou une vitesse ou une accélération de déplacement ou une fréquence de déplacement d'au moins un point de l'éprouvette 120.

[0114] L'éprouvette 120 est généralement contenue dans un plan de base de la plaquette 100. Le déplacement dont les caractéristiques sont mesurées est selon une direction contenue dans ce plan de base ou, alter-

nativement, selon une direction transversale audit plan de base.

[0115] Le signal ainsi obtenu est ensuite traité, généralement par un programme d'ordinateur 320, pour en déduire si une correction dimensionnelle est nécessaire et laquelle.

[0116] Le traitement de signal comprend typiquement une étape d'identification de la fréquence de résonance en fonction de l'amplitude ou de la vitesse ou de l'accélération mesurée, par exemple par analyse fréquentielle par transformée de Fourier.

[0117] On peut noter que le procédé peut ou non intégrer une étape intermédiaire de détermination d'une raideur de l'éprouvette 120, permettant ensuite de calculer/déduire un niveau de correction dimensionnelle à appliquer pour obtenir la raideur finale souhaitée.

[0118] La valeur de correction dimensionnelle des spiraux 110 est déterminée, à partir de la fréquence de résonance déterminée ou le cas échéant de la valeur de raideur calculée, par un modèle prédictif ou par le biais d'une table de correspondance.

[0119] Le modèle mathématique prédictif met par exemple en œuvre un algorithme d'apprentissage automatique, préalablement entraîné lors de mesures de test, et pouvant mettre en œuvre une classification effectuée par un réseau de neurones, ou par un partitionnement.

[0120] Comme alternative, le modèle prédictif peut mettre en œuvre une formule polynomiale, par exemple en effectuant une modélisation par régression linéaire.

[0121] Comme autre alternative, une table de correspondance peut permettre de déterminer plus facilement, bien que moins précisément, la correction dimensionnelle à réaliser.

[0122] Une telle table de correspondance peut être obtenue expérimentalement, par exemple en déterminant expérimentalement de combien un retrait d'une épaisseur d'un micron sur toute la surface de la plaquette 100 fait varier la fréquence de résonance de l'éprouvette 120. Par proportionnalité, on peut ensuite déterminer le nombre de microns d'épaisseur à enlever pour obtenir une fréquence de résonance prédéterminée, correspondant à une raideur souhaitée.

[0123] En variante, on peut utiliser une table de correspondance faisant le lien direct entre une variation d'épaisseur de matière et une variation de raideur de l'éprouvette.

[0124] L'excitation peut être entretenue comme dans l'exemple précité, mais elle peut aussi être ponctuelle et non entretenue.

[0125] Selon un exemple, on pourrait ainsi utiliser un marteau d'excitation ou toute autre source permettant d'induire une excitation vibratoire impulsienne sur l'éprouvette.

[0126] La figure 11 illustre un exemple de caractérisation dans lequel l'éprouvette 120 est chargée, au voisinage de son extrémité distale, par une force F dirigée sensiblement orthogonalement à sa direction principale Z. Une fois l'éprouvette déformée, elle est relâchée (F=0)

et oscille alors de part et d'autre de sa position d'équilibre. Sa fréquence propre peut alors être mesurée.

[0127] Dans ce cas de figure, on pourra aussi utiliser avantageusement une éprouvette 120 telle qu'illustrée sur la figure 6, sous forme d'une lame terminée à son extrémité distale par une portion agrandie 123 formant masse. Cette masse 123 permet d'amplifier le mouvement et de faciliter la mesure.

[0128] Quel que soit le mode d'excitation vibratoire, le principe peut rester le même que décrit précédemment, et consister à enregistrer une amplitude ou une vitesse ou une accélération de déplacement de l'éprouvette, puis traiter le signal ainsi enregistré pour en extraire une fréquence propre ou une ou plusieurs fréquences de résonance de l'éprouvette, pour finalement en déduire la valeur de correction à appliquer.

[0129] Toutefois, la réponse vibratoire à une excitation acoustique ou mécanique n'est qu'un paramètre parmi d'autres permettant de caractériser l'éprouvette 120 afin de déterminer la nécessité d'une correction et le cas échéant le niveau de correction dimensionnelle à appliquer aux spiraux 110 de la plaquette 100.

[0130] Selon une autre méthode de caractérisation illustrée sur la figure 12, l'éprouvette 120 peut être soumise à une force de flexion F prédéterminée, et son amplitude de déformation (flèche f) peut être mesurée par des moyens optiques tels que cités précédemment.

[0131] L'éprouvette 120 se comporte alors comme une poutre encastréelibre. Sa flèche f permet par exemple de déduire directement ou indirectement la correction dimensionnelle à appliquer, par l'une ou l'autre méthode mentionnée précédemment.

[0132] La figure 13 illustre un exemple de table de correspondance pouvant être créée expérimentalement en mesurant pour une flèche f donnée de l'éprouvette quelle est la raideur R_s moyenne des spiraux, et en procédant ensuite à plusieurs itérations de correction, par exemple par oxydation et désoxydation ou par désoxydation partielle et réoxydation dans le cas d'un spiral déjà oxydé.

[0133] L'exploitation du tableau se fait de la manière suivante :

Supposons que l'on mesure une flèche f de valeur correspondante à la valeur f1 et que l'on désire une raideur de valeur R_{s5} , on appliquera à la plaquette une valeur de correction dimensionnelle égale à la somme des valeurs de corrections e2, e3, e4 et e5. Quand les valeurs de flèche et de raideur ne figurent pas exactement sur le tableau, la valeur de correction dimensionnelle peut être obtenue par simple interpolation.

[0134] Selon une autre méthode de caractérisation, l'éprouvette 120 pourrait aussi être simplement mesurée à l'aide d'un dispositif optique adapté. La correction dimensionnelle à appliquer pourrait dans ce cas être déterminée à partir de la ou des dimensions ainsi mesurées.

[0135] Selon encore une autre méthode de caractérisation, dans un cas où l'éprouvette 120 est un spiral de caractérisation de géométrie différente de celle des spiraux à fabriquer 110, comme illustré par exemple sur la

figure 8, on peut mesurer la raideur R_t de ce spiral de caractérisation 120, puis par l'une ou l'autre méthode mentionnée précédemment, déterminer la correction dimensionnelle à appliquer aux spiraux 110.

[0136] On peut par exemple réaliser une mesure de raideur dite dynamique telle que décrite par exemple dans le document EP 2 423 764, en couplant le spiral de caractérisation 120 à un balancier de référence doté d'un moment d'inertie I prédéterminé, en mesurant la fréquence du résonateur formé par l'ensemble balancier/spiral et en déduisant la raideur R_t du spiral de caractérisation 120 à partir de la formule :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_t}{I}}$$

[0137] Comme variante, on peut aussi réaliser une mesure dite statique, comme décrit par exemple dans le document EP 2 128 723, en couplant le spiral de caractérisation à un spiral de référence par l'intermédiaire d'un axe d'un système de rotation, en appliquant une rotation au spiral de référence grâce au système de rotation, le couple étant transmis au spiral de caractérisation par l'intermédiaire de l'axe, en effectuant une mesure différentielle de l'angle de rotation obtenu sur le spiral de caractérisation et de l'angle imposé au spiral de référence, et en utilisant cette mesure pour calculer la raideur du spiral de caractérisation à l'aide de la formule ci-dessous, dans laquelle R_t est la raideur du spiral de caractérisation, R_r est la raideur du spiral de référence, a est l'angle de rotation du spiral de référence et a' est l'angle mesuré sur le spiral de caractérisation.

$$R_t = \frac{R_r \times a}{a'}$$

[0138] La correction dimensionnelle est typiquement réalisée par retrait de matière sur les composants.

[0139] Dans ce cas, les dimensions cibles des composants (en particulier leur largeur) sont initialement choisies plus grandes que des dimensions théoriques permettant d'obtenir la raideur finale souhaitée pour ces composants.

[0140] La correction dimensionnelle peut par exemple être réalisée par oxydation puis désoxydation des spiraux, comme illustré sur les figures 14A à 14C.

[0141] La figure 14A illustre la section d'une lame d'un spiral 110 après sa formation. Sa hauteur est h_a et sa largeur l_a . La valeur de correction dimensionnelle à appliquer au spiral est ici notée e .

[0142] La figure 14B illustre la même section de spiral après qu'une couche de dioxyde de silicium ait été formée sur sa surface externe, consommant une partie du silicium. L'oxydation est réalisée dans l'atmosphère hu-

mide d'un four d'oxydation thermique chauffé à une température avoisinant généralement 1000°C. Sur la figure, la référence 112 désigne le silicium non oxydé et la référence désigne le dioxyde de silicium 114 qui s'est formé. L'épaisseur e' de la couche de dioxyde de silicium résultant de l'oxydation est supérieure à l'épaisseur du silicium non oxydé 112 dont l'oxydation a conduit à ce dioxyde de silicium 114.

[0143] Une épaisseur de dioxyde de silicium, de préférence la totalité du dioxyde de silicium, est ensuite éliminée par gravage, ou par attaque chimique, par exemple avec de l'acide fluorhydrique, pour ajuster les dimensions du spiral. La figure 14C représente la même section du spiral, débarrassé du dioxyde de silicium. Il présente une hauteur h_b inférieure à la hauteur h_a et une largeur l_b inférieure à la largeur l_a .

[0144] Comme alternative, plusieurs ou la totalité des spiraux horlogers peuvent avoir été oxydés avec une épaisseur d'oxyde w après leur formation. Cette épaisseur d'oxyde w correspond à l'épaisseur finale de thermocompensation ou à une épaisseur choisie. Dans ce cas, l'étape de correction dimensionnelle d) peut comprendre au moins une étape de désoxydation partielle ou totale et une réoxydation des spiraux à la valeur w .

[0145] Les exemples mentionnés précédemment illustrent l'intérêt de l'invention pour la détermination et/ou le contrôle de propriétés mécaniques des composants fabriqués, notamment la raideur.

[0146] Comme alternative ou en complément, la caractérisation d'éprouvette(s) selon l'invention peut aussi servir à obtenir des informations sur des dimensions critiques des composants, notamment des cotes difficiles à mesurer à l'aide d'instruments. On peut notamment simuler et optimiser des formes et géométries d'éprouvette qui permettent d'obtenir une signature vibratoire, telle qu'évoquée en lien avec la figure 10, permettant, par lien de causalité, de remonter à n'importe quelle dimension des composants.

[0147] La caractérisation de l'éprouvette 120 peut également permettre de remonter aux caractéristiques fonctionnelles des composants, autrement dit de prévoir la manière avec laquelle lesdits composants interagiront avec d'autres composants de mouvement horloger dans leur mouvement. Par exemple, la signature vibratoire d'une éprouvette peut permettre de déduire un rendement ou une fréquence ou une amplitude de mouvement (à iso paramètres), en fonctionnement.

50 Revendications

1. Procédé de fabrication de composants horlogers (110), dans lequel :

a) dans une plaquette (100) à base de silicium, on forme, selon des dimensions cibles, des composants horlogers (110) ainsi qu'au moins une éprouvette (120) de géométrie cible différente

- de celle des composants (110),
 b) on détermine au moins un paramètre de caractérisation de l'éprouvette (120) représentatif d'une caractéristique des composants,
 c) à partir dudit paramètre, on détermine ladite caractéristique des composants et/ou on détermine si une correction dimensionnelle doit être appliquée aux composants (110).
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel à l'étape b), on applique à l'éprouvette une excitation vibratoire, et on détermine au moins une caractéristique vibratoire de l'éprouvette lors de la vibration, par exemple au moins une fréquence de résonance ou une fréquence propre de vibration.
 3. Procédé de fabrication selon la revendication 2, dans lequel l'excitation vibratoire est variable au cours du temps, et on identifie au moins une caractéristique de résonance de l'éprouvette au cours de la vibration.
 4. Procédé de fabrication selon la revendication 1, dans lequel à l'étape b), on mesure une valeur de déformation (f) de l'éprouvette (120) sous l'effet d'une force de flexion (F) prédéterminée.
 5. Procédé de fabrication selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel l'étape b) comprend une mesure et/ou une détermination d'une fréquence et/ou d'une amplitude et/ou d'une vitesse et/ou d'une accélération de déplacement d'au moins un point de l'éprouvette.
 6. Procédé de fabrication selon la revendication 5, dans lequel l'éprouvette (120) est définie dans un plan de base correspondant au plan général de la plaquette (100) lors de sa formation, et le déplacement est selon une direction contenue dans ledit plan de base.
 7. Procédé de fabrication selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel à l'étape b), on mesure une dimension de l'éprouvette.
 8. Procédé de fabrication selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel à l'étape c) on détermine en outre une valeur de correction dimensionnelle (e) à appliquer aux composants (110).
 9. Procédé de fabrication selon la revendication 8, comprenant en outre une étape d) au cours de laquelle on corrige les dimensions des composants (110) selon la valeur de correction déterminée à l'étape c).
 10. Procédé selon la revendication 9, dans lequel l'étape d) comprend au moins une étape d'oxydation et une étape de désoxydation des composants (110).
 11. Procédé de fabrication selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans lequel la caractéristique des composants et/ou la nécessité d'une correction dimensionnelle et/ou une valeur de correction dimensionnelle (e) à appliquer aux composants (110) est déterminée au moyen d'un modèle prédictif, par exemple mettant en œuvre un algorithme d'apprentissage automatique ou une formule polynomiale.
 12. Procédé de fabrication selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, dans lequel la caractéristique des composants et/ou la nécessité d'une correction dimensionnelle et/ou une valeur de correction dimensionnelle (e) à appliquer aux composants (110) est déterminée par le biais d'une table de correspondance.
 13. Procédé de fabrication selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, dans lequel les composants (110) sont des spiraux horlogers.
 14. Procédé de fabrication selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, dans lequel au moins une éprouvette (120) est un spiral de référence, et à l'étape b), on mesure la raideur effective (Rt) dudit spiral de référence.
 15. Procédé de fabrication selon l'une quelconque des revendications 1 à 14, dans lequel au moins une éprouvette (120) est une lame s'étendant selon une direction rectiligne (Z).
 16. Procédé selon la revendication 15, dans lequel la lame comporte au moins une portion de section constante, de préférence est de section constante sur toute sa longueur.
 17. Procédé selon la revendication 15 ou 16, dans lequel la lame comporte une portion de section agrandie (123) à son extrémité distale (122).
 18. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 17, dans lequel une pluralité d'éprouvettes (120) est formée dans la plaquette (100), et à l'étape b) on calcule une moyenne des paramètres primaires issus de la pluralité d'éprouvettes.
 19. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 18, dans lequel l'étape a) comprend au moins les sous-étapes suivantes :
 - a1) fournir un substrat (10) comprenant une première couche (11) à base de silicium, une deuxième couche (12) à base de silicium et une couche intermédiaire (13) à base d'oxyde de silicium,
 - a2) recouvrir la première couche (11) d'une couche de résine photosensible (20),

a31) exposer la couche de résine photosensible (20) à l'aide d'une source lumineuse, à travers un masque photolithographique (30) muni de fenêtres (31) définissant les contours hors attache des composants horlogers (110) et de la au moins une éprouvette (120),
a32) éliminer localement la résine photosensible au moyen d'un solvant pour former des ouvertures (21) correspondant aux contours hors attache des composants horlogers (110) et de l'éprouvette (120),
a4) graver la première couche (11) sur toute sa hauteur sous lesdites ouvertures (21) pour former les composants horlogers (110) et la au moins une éprouvette (120).

20. Procédé selon la revendication 19, dans lequel le masque photolithographique (30) est un masque corrigé, au moins certaines fenêtres (31) du masque étant de dimensions différentes de sorte à réduire l'étendue d'une dispersion dimensionnelle entre au moins une partie des composants horlogers (110).

25

30

35

40

45

50

55

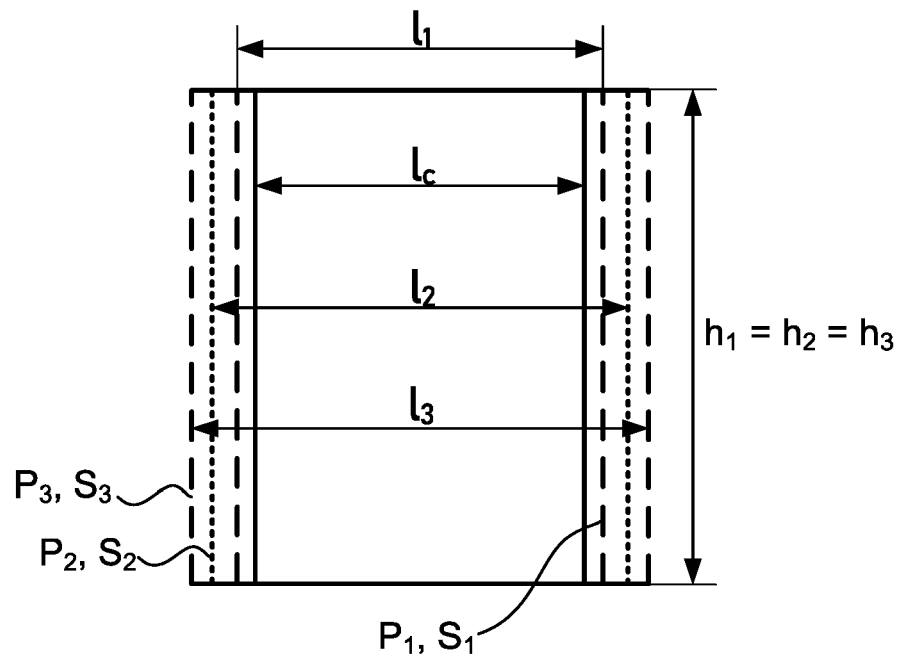


Fig. 1

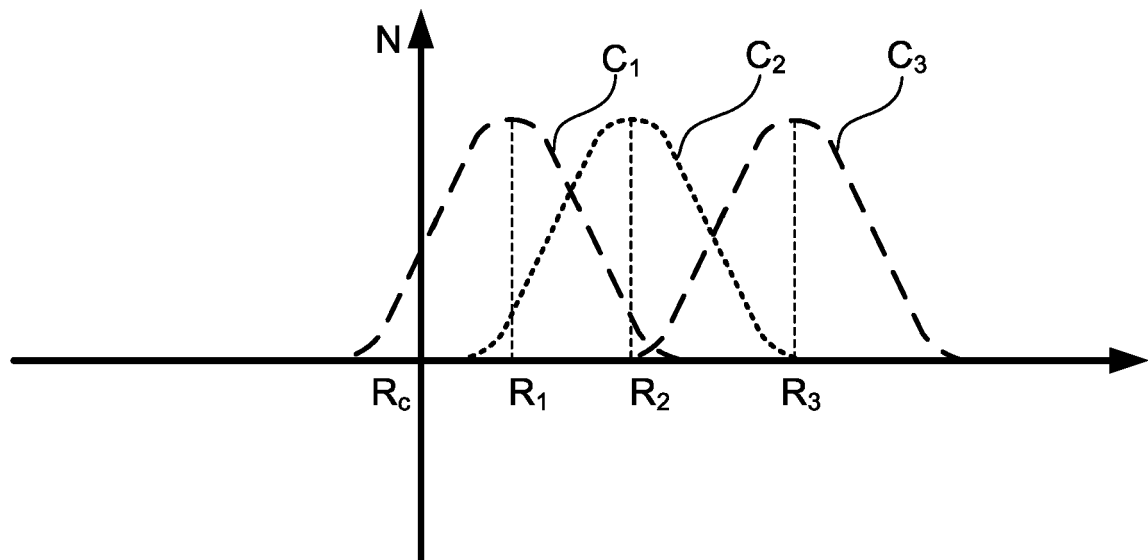


Fig. 2

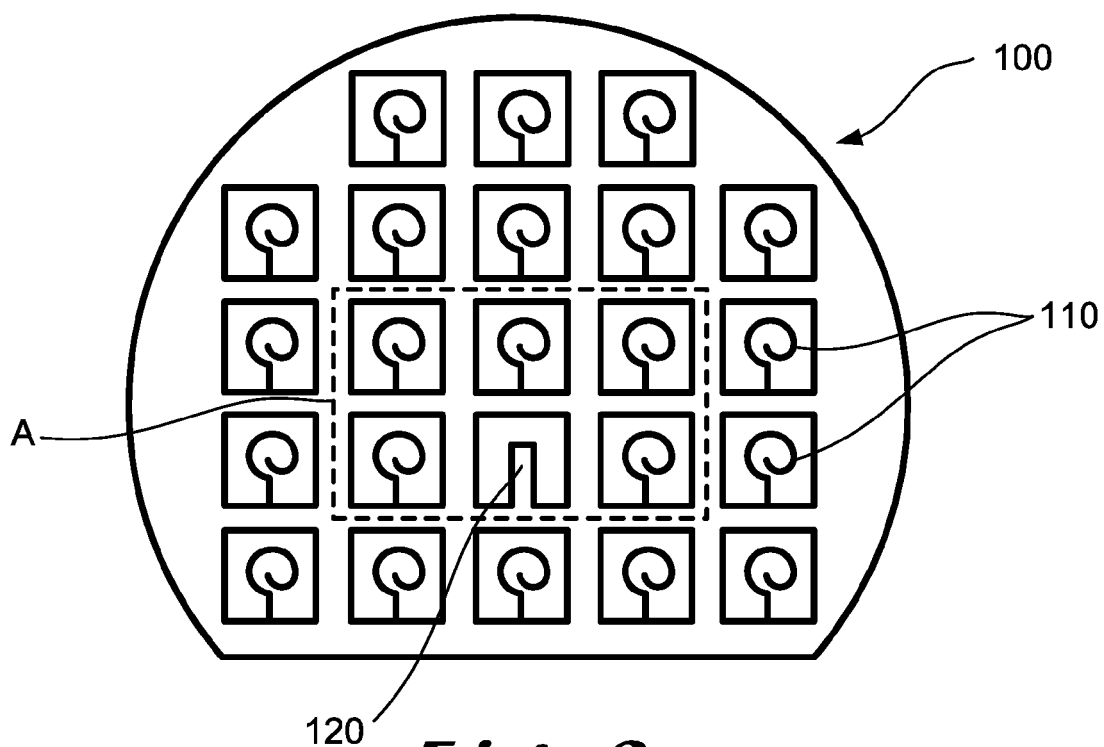


Fig. 3

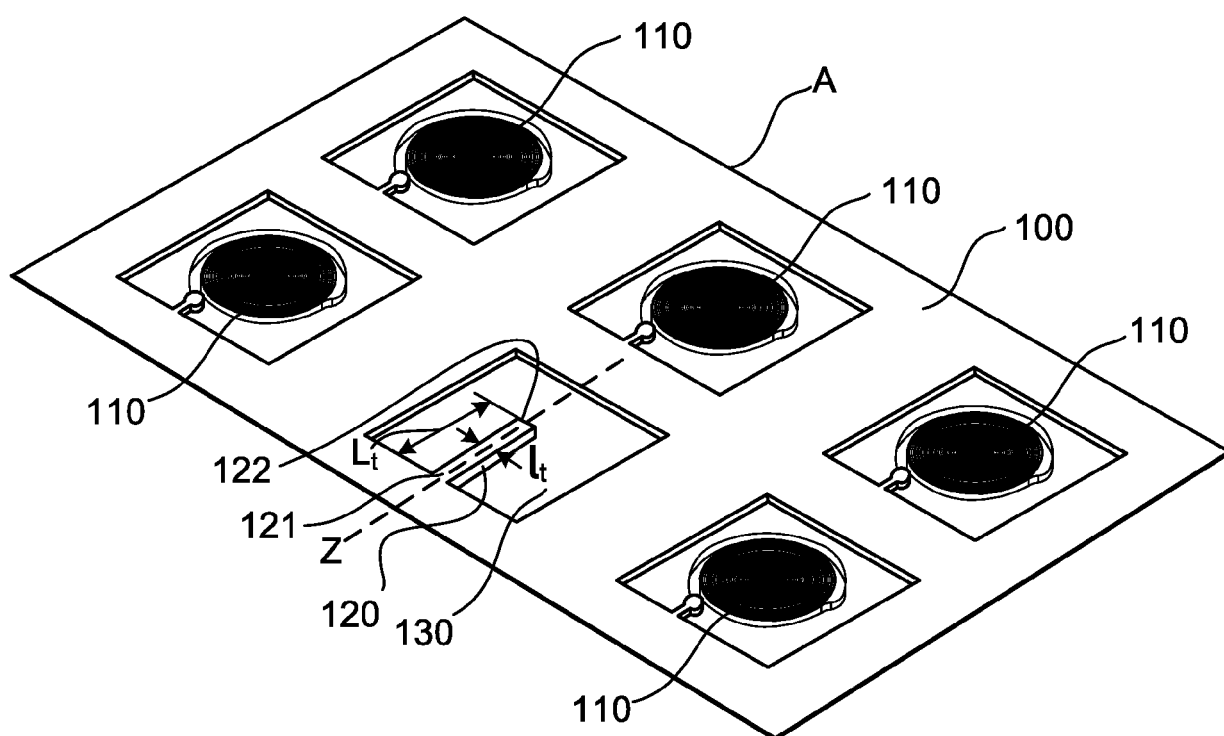


Fig. 4

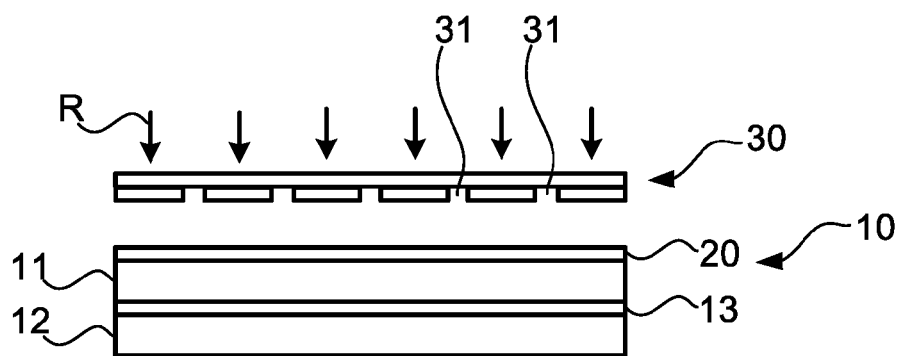


Fig. 5A

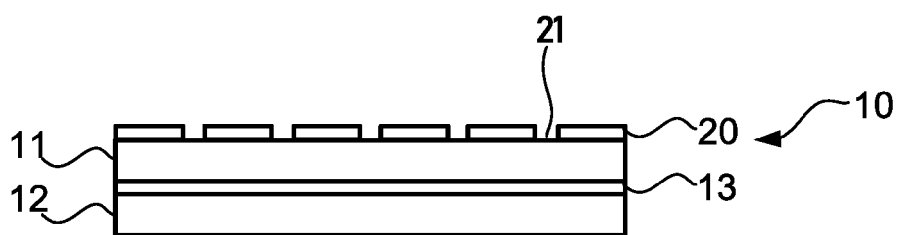


Fig. 5B

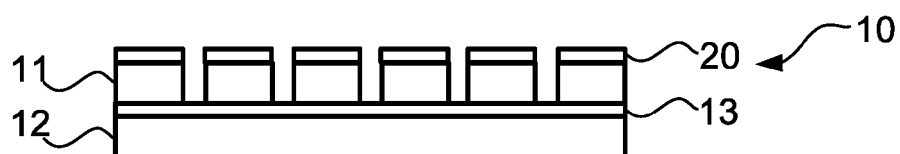


Fig. 5C

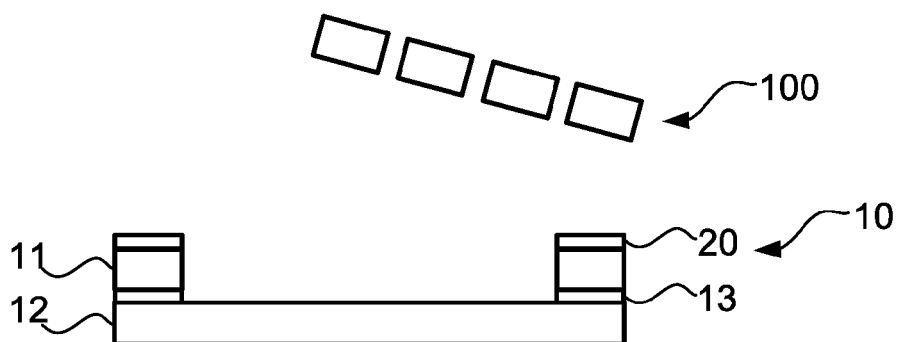
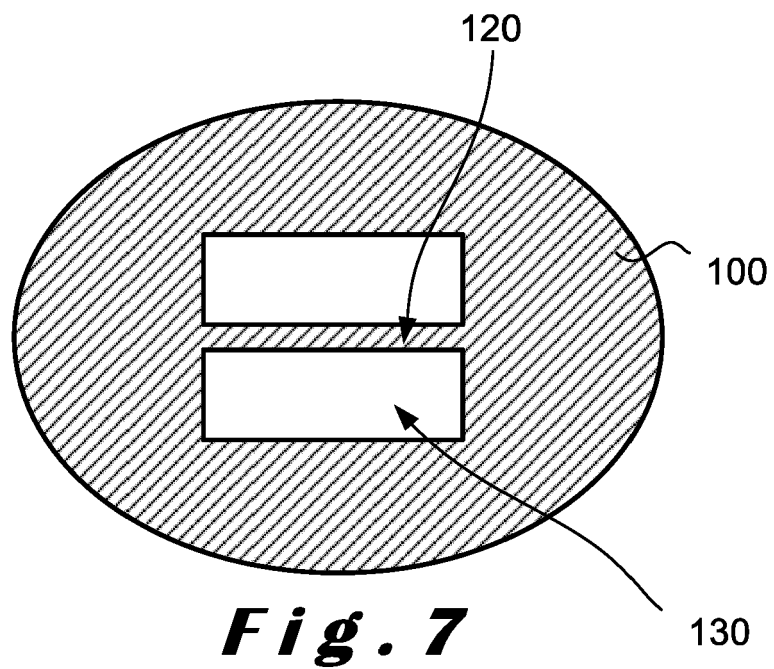
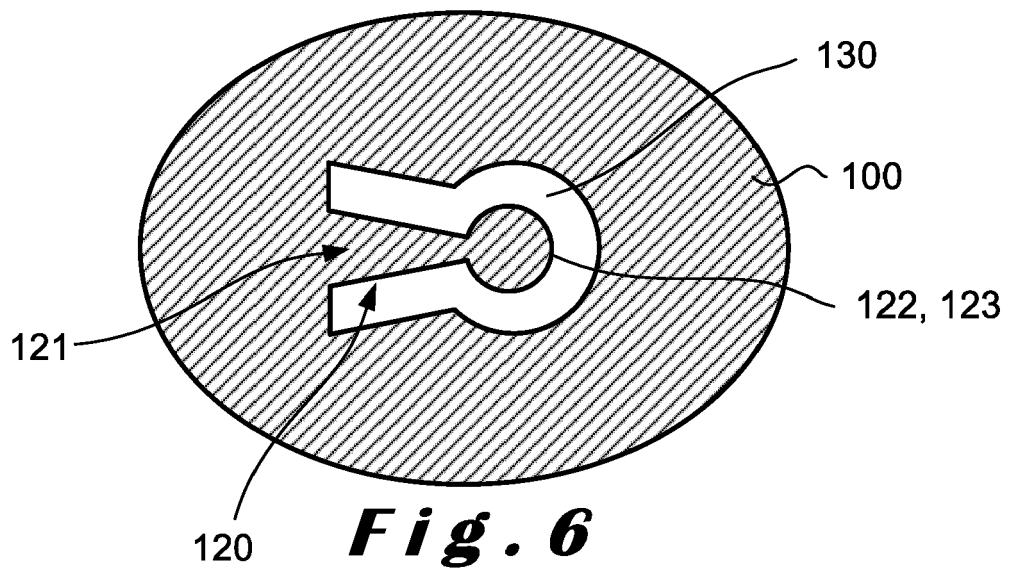
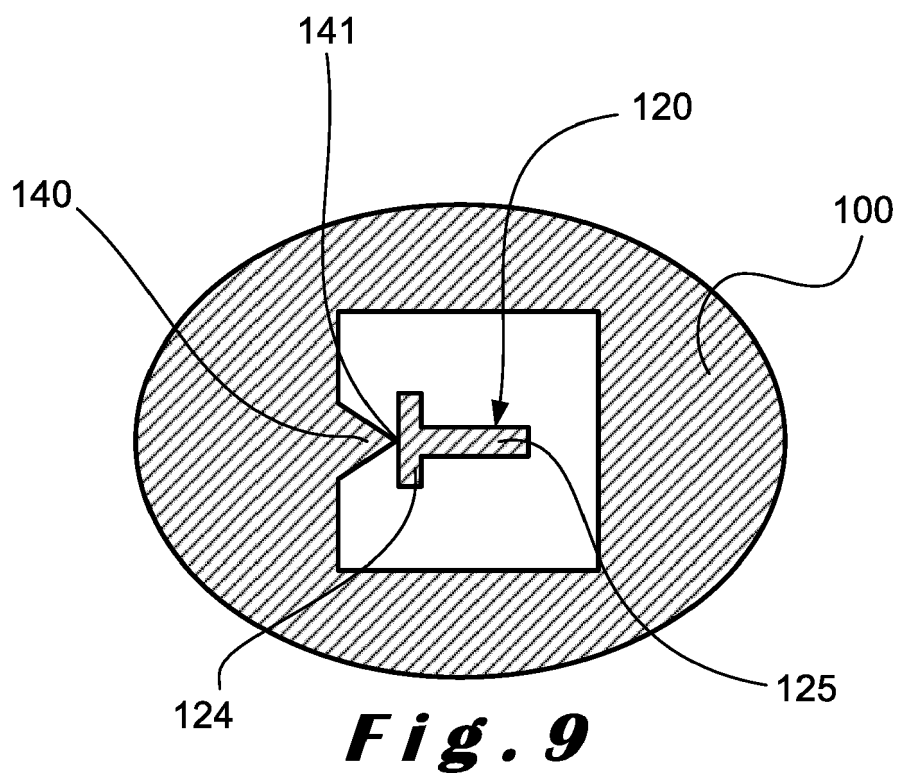
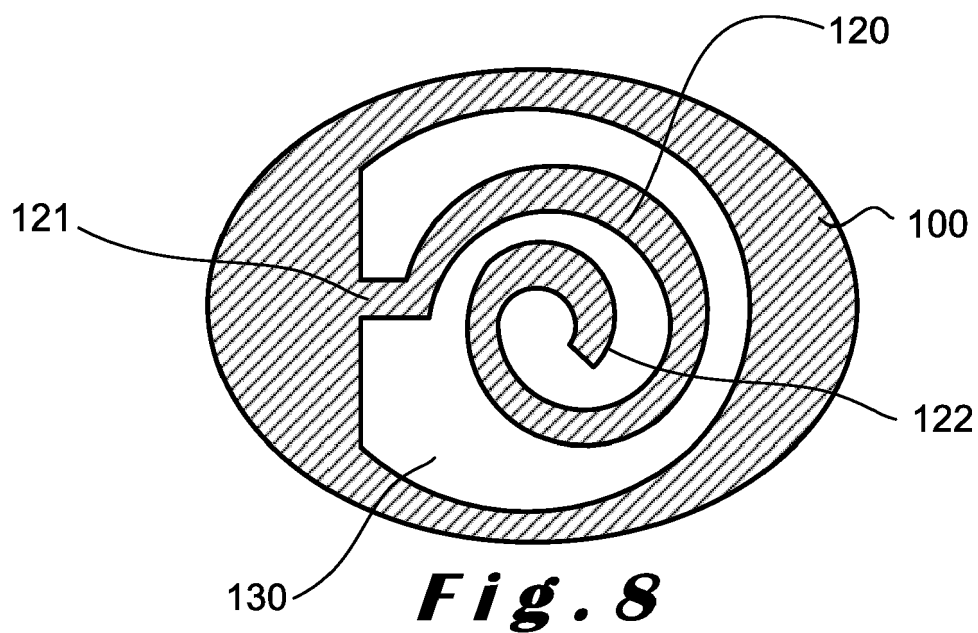
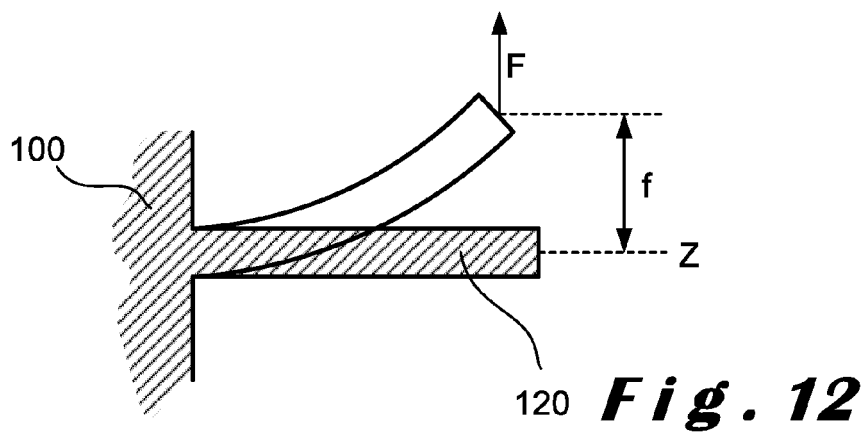
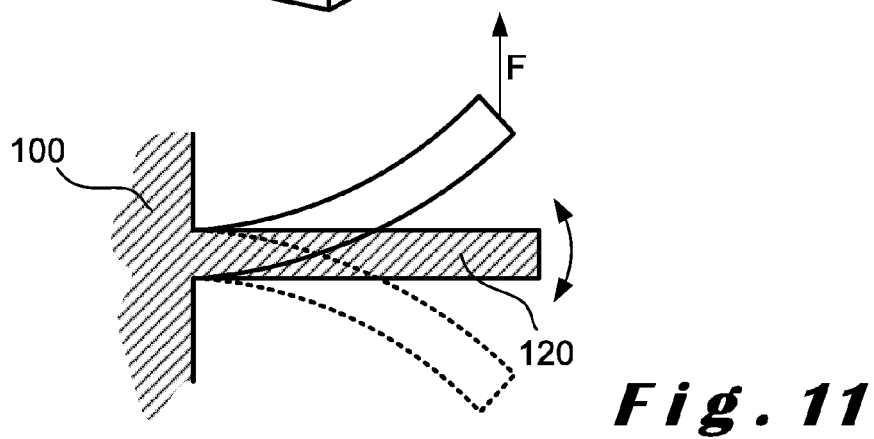
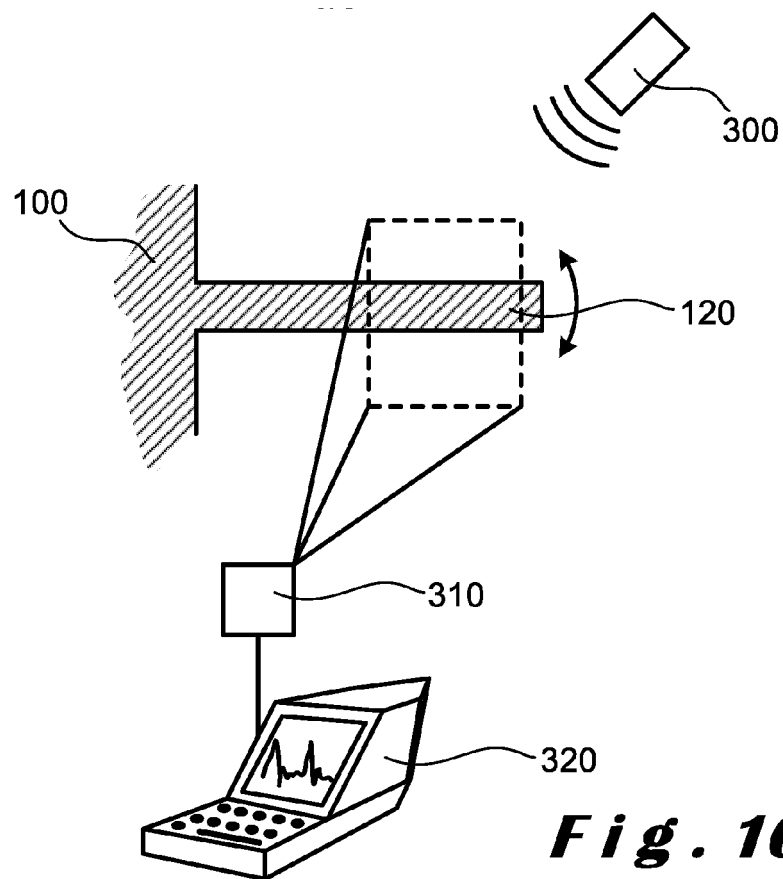


Fig. 5D







Flèche f mesurée	Valeur 0 initiale	Flèche mesurée f ₁	Flèche mesurée f ₂	Flèche mesurée f ₃	Flèche mesurée f ₄	Flèche mesurée f ₅	Flèche mesurée f ₆
Valeur de correction dimensionnelle e	-	e1	e2	e3	e4	e5	e6
Raideur R ₁ mesurée	Raideur R _{s0} Initiale mesurée	Raideur Mesurée R _{s1}	Raideur Mesurée R _{s2}	Raideur Mesurée R _{s3}	Raideur Mesurée R _{s4}	Raideur Mesurée R _{s5}	Raideur Mesurée R _{s6}

Fig. 13

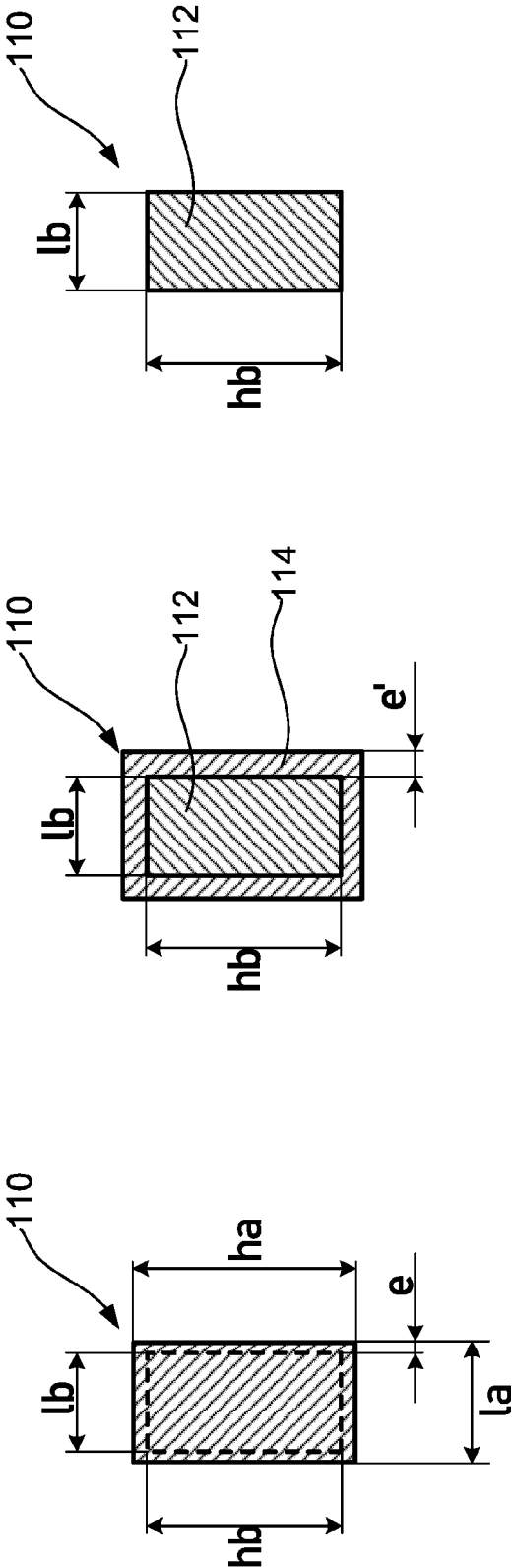


Fig. 14A

Fig. 14B

Fig. 14C

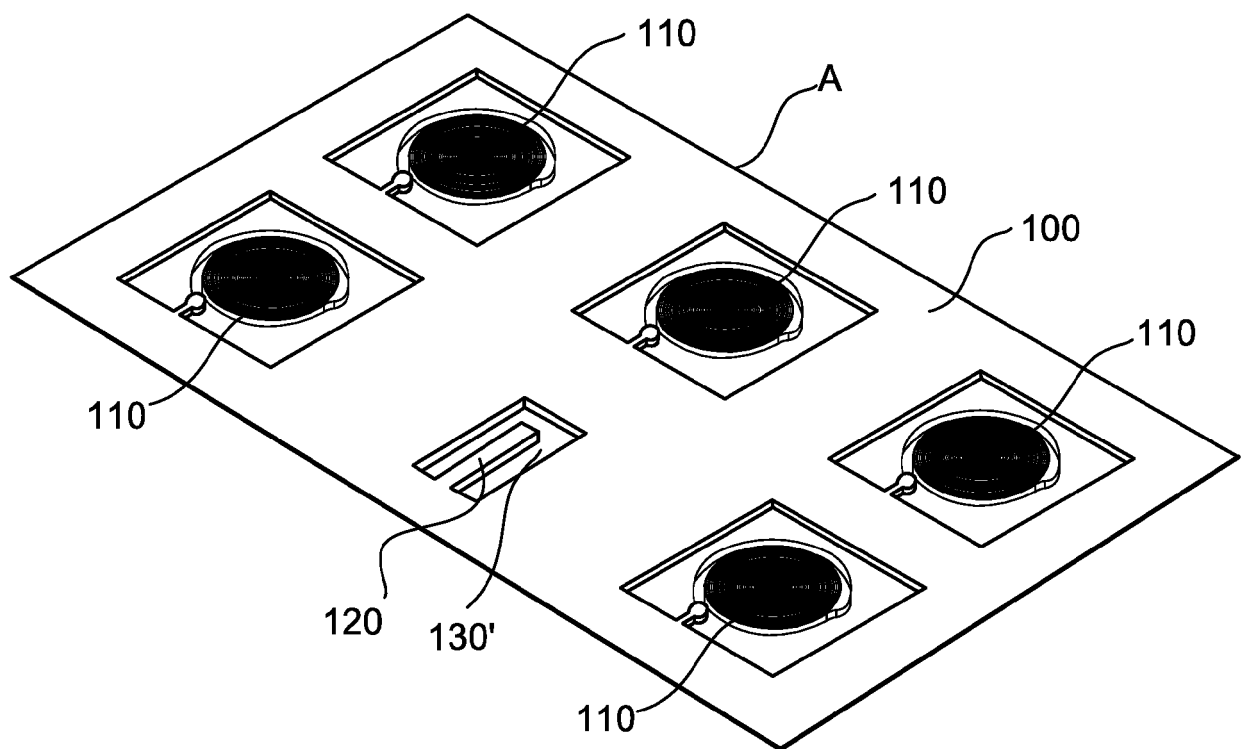


Fig. 15



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 22 17 2162

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
X	EP 3 915 788 A1 (SIGATEC SA [CH]) 1 décembre 2021 (2021-12-01)	1-3, 5-14, 18-20	INV. G04B1/14 G04B15/14 G04B17/06
Y	* alinéas [0010], [0021], [0028], [0120] - [0129], [0143]; revendications 1-15 *	4 15-17	
X	CH 716 605 A1 (RICHEMONT INT SA [CH]; TRONICS MICROSYSTEMS S A [FR]) 31 mars 2021 (2021-03-31) * alinéas [0026], [0027], [0050] *	1, 4, 8-14, 18-20	
Y	EP 3 982 205 A1 (PATEK PHILIPPE SA GENEVE [CH]) 13 avril 2022 (2022-04-13) * alinéas [0029], [0043]; figure 3 *	4	
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
			G04B
Lieu de la recherche		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
La Haye		7 septembre 2022	Sigrist, Marion
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
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			

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

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

EP 22 17 2162

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

07-09-2022

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 3915788 A1	01-12-2021	CH 716603 A1	31-03-2021
		EP 3845770 A1	07-07-2021
		EP 3915788 A1	01-12-2021
CH 716605 A1	31-03-2021	CH 716605 A1	31-03-2021
		CN 114730154 A	08-07-2022
		EP 4031936 A1	27-07-2022
		WO 2021053501 A1	25-03-2021
EP 3982205 A1	13-04-2022	AUCUN	

EPO FORM P0460

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

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

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

Documents brevets cités dans la description

- EP 3181938 A [0012]
- EP 3845770 A1 [0013] [0089]
- EP 2423764 A [0136]
- EP 2128723 A [0137]