



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
24.01.2024 Bulletin 2024/04

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):
G04B 17/06 ^(2006.01) **B81C 1/00** ^(2006.01)
G04D 7/10 ^(2006.01) **G04D 7/12** ^(2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **22185552.1**

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):
G04B 17/066; B81C 1/0065; G04D 7/10;
G04D 7/1271

(22) Date de dépôt: **18.07.2022**

(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:
• **SOOBARAYEN, Kevin**
25300 Pontarlier (FR)
• **TOBENAS, Susana**
2017 Boudry (CH)

(74) Mandataire: **Novagraaf International SA**
Chemin de l'Echo 3
1213 Onex, Geneva (CH)

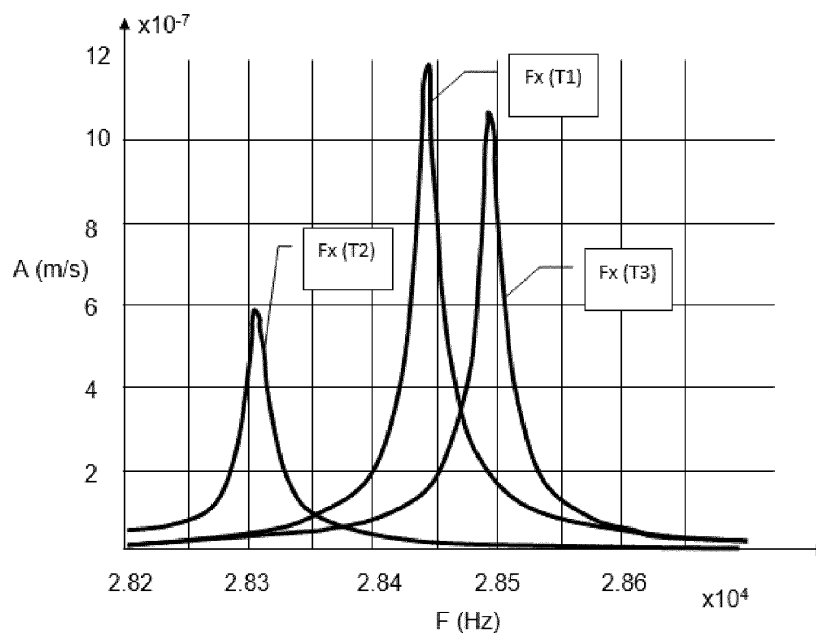
(71) Demandeur: **Richemont International S.A.**
1752 Villars-sur-Glâne (CH)

(54) **PROCÉDÉ DE CONTROLE ET DE FABRICATION DE RESSORTS SPIRAUX D'HORLOGERIE**

(57) Procédé de contrôle d'un spiral ou d'une ébauche de spiral agencée pour former un spiral, le procédé de contrôle comportant les étapes suivantes :
a. appliquer au spiral ou à l'ébauche de spiral une excitation vibratoire variable au cours du temps pour couvrir une plage fréquentielle prédéterminée,
b. identifier au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance du spiral ou de l'ébauche de spiral, telle

qu'un pic de résonance, lors de ou en réponse à l'excitation vibratoire sur la plage fréquentielle prédéterminée, c. soumettre à une machine de prédiction de coefficient thermique la caractéristique de fréquence de résonance identifiée à l'étape b. pour déterminer un coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou un coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral.

Fig. 11



Description**Domaine technique**

5 **[0001]** La présente invention se rapporte au domaine du contrôle et de la fabrication de pièces pour l'horlogerie. L'invention concerne plus particulièrement un procédé de contrôle et de fabrication de ressorts spiraux d'horlogerie, autrement appelés résonateurs.

Etat de la technique

10 **[0002]** Les mouvements de montres mécaniques sont régulés au moyen d'un régulateur ou oscillateur mécanique comprenant un résonateur, c'est-à-dire un composant déformable élastiquement et dont les oscillations déterminent la marche de la montre. De nombreuses montres comportent par exemple un oscillateur comprenant un spiral comme résonateur, monté sur l'axe d'un balancier et mis en oscillation grâce à un échappement. La fréquence propre du couple balancier-spiral permet de réguler la marche de la montre et dépend de plusieurs paramètres, notamment la raideur du spiral et la température de fonctionnement.

15 **[0003]** En effet, la fréquence f de l'organe régulateur formé par le spiral de raideur R accouplé à un balancier d'inertie I est donnée par la formule :

20 [équation 1]

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

25 **[0004]** La raideur du spiral définit également ses caractéristiques vibratoires intrinsèques, comme la fréquence propre et les fréquences de résonance. Dans la présente demande, la fréquence propre d'un système élastique (un résonateur seul ou un couple résonateur - balancier) est la fréquence à laquelle oscille ce système lorsqu'il est en évolution libre, c'est-à-dire sans force excitatrice. Par ailleurs, une fréquence de résonance d'un système élastique (par exemple le résonateur seul) 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 élastique. En d'autres termes, si le système élastique est excité avec une source d'excitation de fréquence variable au cours du temps, l'amplitude de déplacement suit une pente ascendante avant cette fréquence de résonance, et suit une pente descendante après, en tout point qui ne correspond pas à un noeud de vibration. Typiquement, lors d'un tel essai, l'enregistrement de l'amplitude de déplacement en fonction de la fréquence d'excitation présente un pic d'amplitude de déplacement ou pic de résonance qui est associé ou qui caractérise la fréquence de résonance.

35 **[0005]** La raideur d'un résonateur de type spiral dépend typiquement des caractéristiques du matériau dans lequel il est réalisé, ainsi que de ses dimensions et en particulier de l'épaisseur (c'est-à-dire de la largeur) de ses spires le long de son barreau. La raideur est donnée plus spécifiquement par :

[équation 2]

$$R = \frac{M}{\varphi}$$

avec :

50 φ , l'angle de torsion du ressort, et
 M , le couple de rappel du ressort spiral,
ou M , pour un barreau de section constante constitué d'un matériau spécifique, est donné par :

55

[équation 3]

$$M = \frac{E \left(\frac{e^3 h}{12} \varphi \right)}{L}$$

avec :

E , le module d'Young du matériau employé pour le barreau,
 L , la longueur du barreau,
 h , la hauteur du barreau, et
 e , l'épaisseur ou la largeur du barreau.

[0006] Comme cela sera expliqué plus en détail ci-dessous, la température de fonctionnement est un paramètre influent sur la marche de l'organe régulateur, on peut dériver l'équation 1 par rapport à la température T , et on trouve :

[Équation 4]

$$\frac{1}{F} \frac{dF}{dT} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E(T_0)} \frac{dE}{dT} + 3\alpha_S - 2\alpha_B \right)$$

Avec :

T , la température courante,
 T_0 , une température de référence,
 α_S , le coefficient de dilatation thermique du spiral
 α_B , le coefficient de dilatation thermique de la serge de balancier.

[0007] On peut réécrire cette équation 4 comme ci-dessous :

[Équation 5]

$$CT = \frac{1}{2} (CTE + 3\alpha_S - 2\alpha_B)$$

Avec :

CT : le coefficient thermique de l'oscillateur (secondes par jour et par degré),
 CTE : le coefficient thermique de module de Young (K^{-1}), ou autrement appelé coefficient thermo-élastique.

[0008] La fréquence propre de l'organe régulateur formé par le spiral de raideur R accouplé à un balancier d'inertie I est notamment proportionnelle à la racine carrée de la raideur du spiral. La spécification principale d'un ressort spiral est sa raideur, qui doit se trouver dans un intervalle bien défini pour pouvoir être appairé avec un balancier, qui forme l'élément inertiel de l'oscillateur. Cette opération d'appairage est indispensable pour régler précisément la fréquence d'un oscillateur mécanique.

[0009] L'importance des champs magnétiques dans l'environnement moderne, a poussé les horlogers à utiliser depuis quelques années, des spiraux en silicium, moins sensible aux perturbations magnétiques que des spiraux métalliques.

[0010] Très avantageusement, on peut fabriquer plusieurs centaines de spiraux en silicium sur une seule plaquette (en anglais « wafer ») en utilisant les technologies de micro-fabrication. Il est notamment connu de réaliser une pluralité de résonateurs en silicium avec une très haute précision en utilisant des procédés de photolithographie et d'usinage / gravure dans une plaquette en silicium. Les procédés de réalisation de ces résonateurs mécaniques utilisent généralement des plaquettes de silicium monocristallin, mais des plaquettes en d'autres matériaux sont également utilisables, par exemple en silicium polycristallin ou amorphe, en d'autres matériaux semi-conducteurs, en verre, en céramique, en

carbone, en nanotubes de carbone ou en un composite comprenant ces matériaux. Pour sa part, le silicium monocristallin appartient à la classe cristalline cubique m3m dont le coefficient d'expansion thermique (α) est isotrope.

[0011] Il est très important que les caractéristiques de l'oscillateur soient aussi stables que possible, afin d'avoir une marche de la montre qui soit également stable, avec en particulier le moins de différences de marche possibles en fonction de la température de fonctionnement (été-hiver, montre bracelet portée ou non portée).

[0012] Le silicium présente une valeur du premier coefficient thermoélastique très négative, et par conséquent, la raideur d'un résonateur en silicium, et donc sa fréquence propre, varie fortement selon la température. Afin de compenser au moins partiellement cet inconvénient, les documents EP1422436, EP2215531 et WO2016128694 décrivent un résonateur mécanique de type spiral réalisé à partir d'une âme (ou de deux âmes dans le cas de WO2016128694) en silicium monocristallin et dont les variations en température du module d'Young sont compensées par une couche en oxyde de silicium (SiO_2) amorphe entourant l'âme (ou les âmes), ce dernier étant un des rares matériaux présentant un coefficient thermoélastique positif. Comme le montre l'équation 5 ci-dessus, des variations de températures peuvent conduire à des variations de marche avec le coefficient thermique CT qui dépend notamment du coefficient thermique de module de Young, du coefficient thermique de dilatation du spiral et du coefficient thermique de dilatation de la serge de balancier. Les spiraux en silicium et leur thermo-compensation permettent donc d'ajuster les termes de l'équation 5 relatifs au spiral pour obtenir un coefficient thermique CT de l'oscillateur. Par extension, on peut également caractériser le CT d'un système horloger plus étendu, qui intègre le spiral, en allant jusqu'au CT d'un calibre complet, en déterminant la dérive thermique du calibre intégrant celle de l'échappement, du rouage, y-compris l'influence de la lubrification. Dans cette perspective, le spiral est considéré comme étant l'unique variable d'ajustement pour obtenir un CT du système horloger qui l'intègre, le plus faible possible.

[0013] Lorsque l'on réalise des spiraux en silicium ou en un autre matériau par fabrication collective sur une plaquette, le rendement fonctionnel final sera donné par le nombre de spiraux dont la raideur correspond à l'intervalle d'appairage, divisé par le nombre total de spiraux sur la plaquette.

[0014] Cependant, les étapes de micro-fabrication et plus particulièrement de gravure, employées dans la fabrication de spiraux sur une plaquette résultent typiquement en une dispersion géométrique importante entre les dimensions des spiraux d'une même plaquette, et donc d'une dispersion importante entre leurs raideurs, nonobstant que le motif de gravure est le même pour chaque spiral. La dispersion de raideur mesurée suit normalement une distribution gaussienne. Afin d'optimiser le rendement de fabrication, on s'intéresse donc à centrer la moyenne de la distribution gaussienne sur une valeur de raideur nominale et également à réduire l'écart-type de cette gaussienne.

[0015] De plus, la dispersion de raideurs est encore plus grande entre des spiraux de deux plaquettes gravées à des moments différents suivant les mêmes spécifications de procédé. Ce phénomène est montré à la figure 1 où les courbes de dispersion de la raideur Rd1, Rd2 et Rd3 pour les spiraux sur trois plaquettes différentes sont illustrées. De manière générale, pour chaque plaquette la distribution des raideurs R (par rapport au nombre de spiraux N avec cette raideur) suit la loi normale ou gaussienne, chaque courbe de dispersion étant centrée sur sa valeur moyenne respective Rm1, Rm2 et Rm3.

[0016] Les documents WO2015113973 et EP3181938 proposent de remédier à ce problème en formant 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 formé 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 du spiral avec la raideur prédéterminée, et en retirant cette épaisseur du spiral. De manière similaire, le document EP3181939 propose de remédier à ce même problème en formant un spiral selon des dimensions inférieures aux dimensions nécessaires pour l'obtention d'un spiral d'une raideur prédéterminée, en déterminant la raideur de ce spiral formé en l'accouplant avec un balancier doté d'une inertie prédéterminée, en calculant l'épaisseur de matériau à ajouter pour obtenir les dimensions nécessaires pour l'obtention du spiral avec la raideur prédéterminée, et en ajoutant cette épaisseur de matériau au spiral.

[0017] De cette manière, comme le démontre la figure 2, nonobstant la raideur moyenne Rm1, Rm2, etc. des raideurs sur une plaquette donnée, la courbe de dispersion de raideurs Rd1, Rd2, etc. peut-être recentrée par rapport à une valeur de raideur nominale Rnom.

[0018] Cette approche nécessite une grande précision au niveau de la mesure de la fréquence du spiral pour déterminer sa raideur. En particulier, des erreurs de mesure peuvent être causées par le balancier d'inertie prédéterminée, ou par le montage effectué. On doit ensuite réaliser une étape de calcul de l'épaisseur à retirer pour, à nouveau, retirer avec une grande précision l'épaisseur calculée. De plus, on peut noter que l'accouplement du spiral avec le balancier doté d'une inertie prédéterminée nécessite des opérations minutieuses et requérant un temps de préparation élevé. Enfin, on peut également noter que toute opération d'assemblage sur des pièces ou ébauches encore présentes sur une plaquette augmente significativement le risque de pollution (par exemple présence des fines particules de silicium (débris) produits lors des manipulations).

[0019] La présente invention a pour but de proposer une approche exempte des inconvénients ci-dessus, qui permette un flux de production plus rapide et/ou avec moins de risques de pollution(s), et/ou un échantillonnage plus important, et/ou une mesure plus précise du coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou du coefficient thermique

(CT) d'un système horloger comprenant le spiral, et donc une correction plus individualisée des spiraux de la plaquette pour obtenir des systèmes horlogers dont la marche est peu ou pas perturbée par des variations de température.

Divulguation de l'invention

[0020] De façon plus précise, un premier aspect de l'invention concerne un procédé de contrôle d'un spiral ou d'une ébauche de spiral agencée pour former un spiral, le procédé de contrôle comportant les étapes suivantes :

- a. appliquer au spiral ou à l'ébauche de spiral une excitation vibratoire variable au cours du temps pour couvrir une plage fréquentielle prédéterminée,
- b. identifier au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance du spiral ou de l'ébauche de spiral, telle qu'un pic de résonance, lors de ou en réponse à l'excitation vibratoire sur la plage fréquentielle prédéterminée,
- c. soumettre à une machine de prédiction de coefficient thermique la caractéristique de fréquence de résonance identifiée à l'étape b. pour déterminer un coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou un coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral.

[0021] Le procédé selon la mise en oeuvre ci-dessus comprend une étape d'excitation vibratoire du spiral ou de l'ébauche de spiral et la mesure d'une caractéristique d'une fréquence de résonance, pour en déduire ensuite par prédiction un coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou un coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral. Il n'y a pas de montage avec un balancier ou un autre composant, ce qui permet de gagner du temps. De plus, la mesure est effectuée sur les spiraux ou les ébauches seul(es), ce qui limite les erreurs induites par d'autres composants ou leur montage, ainsi que des pollutions éventuelles. La précision de mesure est améliorée car il y a moins de sources de variabilité dues à d'autres composants ou à des pollutions. Autrement dit, le spiral ou l'ébauche de spiral est testé(e) seul(e). L'excitation vibratoire est appliquée à la pièce ou à l'ébauche unitaire, non accouplée à un quelconque balancier, poids ou système oscillant. Le procédé permet de contrôler les pièces unitaires et libres (c'est-à-dire avec au moins une extrémité libre, non attachée à un quelconque mécanisme ou balancier), ce qui apporte au moins des avantages de gains de productivité (pas de montage avec un système oscillant), des gains de qualité (pas de pollution des pièces, ni de casse, et plus de pièces peuvent être testées dans le même budget), un gain de précision (pas d'erreur liée à d'autres composants d'un système oscillant).

[0022] On notera que la détermination du coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral ou de l'ébauche de spiral par le procédé selon l'invention est bien adaptée pour des pièces oxydées pour lesquelles on ne connaît pas précisément l'épaisseur de la couche d'oxyde à ce stade du procédé de fabrication. Avec la présente invention, on peut aisément obtenir le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral oxydé ou de l'ébauche de spiral oxydée, qui sont en quelque sorte des pièces composites (cœur ou âme en silicium, avec une coque en oxyde de silicium).

[0023] Selon un mode de réalisation, l'excitation vibratoire peut être effectuée avec un dispositif à choc qui applique dans un temps assez bref une excitation à la pièce à tester. Autrement dit, on peut prévoir d'imposer un déplacement ou une accélération aux pièces à tester dans un temps très bref (sur une durée de moins d'une seconde, moins de 500 ms, moins de 100 ms, moins de 10 ms). En particulier, le dispositif à choc peut appliquer un choc au spiral ou à son support pour faire vibrer les pièces. On peut utiliser un marteau à choc ou tout dispositif avec une masse mobile. Dans le cas de pièces attachées à une plaquette, on peut prévoir d'appliquer le choc sur la plaquette, ou sur un posage supportant la plaquette. En fonction de la pièce à tester et de sa position sur la plaquette, on peut prévoir d'appliquer le choc à une endroit particulier sur la plaquette et/ou selon une direction particulière. Les pièces entrent en vibration et on peut enregistrer au cours du temps la réponse vibratoire, pour extraire de cette mesure des pics de résonance et leurs fréquences, avec par exemple une transformée de Fourier.

[0024] Selon un mode de réalisation, le système horloger comprenant le spiral peut comprendre :

- le spiral, et un balancier,
- le spiral, un balancier, et un dispositif d'échappement, comme un échappement à ancre,
- le spiral, un balancier, un dispositif d'échappement, et un rouage, comme un rouage de finissage,
- l'intégralité du mouvement de la montre, y-compris le spiral.

Dans tous les cas ci-dessus, il est possible de connaître par avance la valeur du coefficient thermique des pièces autres que le spiral, ou à tout le moins leur contribution sur le coefficient thermique du système horloger. En pratique, ces valeurs sont standard et connues à l'avance en fonction des références ou composants choisis, et dans le cas d'un spiral en silicium, il est possible d'ajuster la contribution du spiral dans l'équation 5 ci-dessus pour obtenir un coefficient thermique du système horloger qui sera dans une plage de valeurs et/ou dans une tolérance désirée(s).

[0025] Selon un mode de réalisation, l'excitation vibratoire est appliquée au spiral ou à l'ébauche de spiral ayant une extrémité libre (typiquement la virole centrale) et une autre extrémité fixée à la plaquette ou à une pince. D'un point de

vue mécanique, on peut considérer schématiquement que l'excitation vibratoire est appliquée à une masse (située au centre de gravité du spiral) reliée à un référentiel (une pince de préhension pour un spiral seul, ou le reste d'un substrat ou d'une plaque pour une ébauche par exemple en silicium et pas détachée) par un ressort (la partie élastique du spiral). L'excitation vibratoire met en mouvement la masse suspendue.

5 **[0026]** On peut aussi noter que s'il est déterminé qu'il faut apporter une correction dimensionnelle et/ou un traitement supplémentaire(s) à la pièce testée (ou à l'ensemble des pièces unitaires attachées à une même plaquette, ou encore aux pièces unitaires attachées à une zone d'une plaquette, incluant ou non la pièce testée), cela peut se faire sur la (ou les) pièce(s) unitaire(s) sans redémonter quoi que ce soit (on peut prévoir par exemple d'appliquer directement en sortie de test une oxydation sur une pièce en silicium). On peut donc prévoir d'apporter ou d'enlever de la matière sur la (ou les) pièce(s) unitaire(s), de faire un dopage pour faire varier des valeurs intrinsèques (raideur, coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral). Autrement dit, la correction dimensionnelle et/ou le traitement supplémentaire(s) sont effectués sur la (ou les) pièce(s) unitaire(s).

10 **[0027]** Le procédé selon la mise en oeuvre ci-dessus permet donc de tester des ébauches de spiraux en cours de fabrication en limitant les risques de pollution ou d'erreurs de montage. Une correction dimensionnelle (de section, de hauteur et/ou d'épaisseur) et/ou un traitement supplémentaire(s) sont alors possibles. Le procédé selon la mise en oeuvre ci-dessus permet tout aussi bien de tester des spiraux terminés pour par exemple effectuer un classement par incréments de raideur, ou pour prévoir un appairage avec un balancier particulier.

15 **[0028]** Selon un mode de réalisation,

20 l'étape b. peut comprendre :

b1. une première étape d'identification pouvant comprendre l'identification d'une première caractéristique d'une première fréquence de résonance telle qu'un premier pic de résonance,

25 b2. une deuxième étape d'identification pouvant comprendre l'identification d'une deuxième caractéristique d'une deuxième fréquence de résonance telle qu'un deuxième pic de résonance, la deuxième fréquence de résonance étant différente de la première fréquence de résonance,

et l'étape c. peut comprendre :

30 c1. une première étape de prédiction pouvant consister à soumettre à une autre machine de prédiction la première caractéristique de la première fréquence de résonance pour déterminer un paramètre différent du coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou du coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral, tel qu'une raideur ou un défaut du spiral ou de l'ébauche de spiral,

35 c2. une deuxième étape de prédiction pouvant consister à soumettre à la machine de prédiction de coefficient thermique la deuxième caractéristique de la deuxième fréquence de résonance pour déterminer le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral.

40 **[0029]** Selon le mode de réalisation ci-dessus, la première fréquence de résonance est utilisée pour déterminer un paramètre différent du coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou du coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral, comme par exemple une raideur ou un défaut du spiral ou de l'ébauche de spiral. La deuxième fréquence de résonance est utilisée quant à elle pour déterminer le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral. Autrement dit, deux fréquences différentes sont retenues ou identifiées pour prédire ou calculer deux paramètres distincts (raideur ou présence d'un défaut d'une part, le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger d'autre part).

45 **[0030]** Selon un mode de réalisation, les étapes b1 et b2 peuvent être séparées par une étape de thermo-compensation telle qu'une étape d'oxydation, et l'étape a. peut comprendre :

50 a1. une première étape d'excitation vibratoire, pouvant être effectuée avant l'étape b1. et consistant à appliquer au spiral ou à l'ébauche de spiral une première excitation vibratoire variable au cours du temps pour couvrir une première plage fréquentielle prédéterminée,

55 a2. une deuxième étape d'excitation vibratoire, pouvant être effectuée avant l'étape b2. et consistant à appliquer au spiral oxydé ou à l'ébauche de spiral oxydée une deuxième excitation vibratoire variable au cours du temps pour couvrir la première plage fréquentielle prédéterminée ou une deuxième plage fréquentielle prédéterminée.

[0031] Selon la mise en oeuvre ci-dessus, la première étape d'excitation vibratoire permet de déterminer une raideur ou la présence d'un défaut, et la deuxième étape d'excitation vibratoire permet de déterminer le coefficient thermique

du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger. On peut imposer des excitations vibratoires différentes entre les étapes a1 et a2.

[0032] Selon un mode de réalisation,

l'étape a. peut être mise en œuvre après une étape d'oxydation, et les étapes b1. et b2. peuvent prendre en compte ou peuvent se baser sur la même réponse vibratoire du spiral ou de l'ébauche de spiral. Autrement dit, une première partie de la réponse vibratoire est exploitée pour identifier la première fréquence de résonance et une deuxième partie de la même réponse vibratoire est exploitée pour identifier la deuxième fréquence de résonance.

[0033] Selon un mode de réalisation :

- la première fréquence de résonance peut être choisie pour être une fréquence de résonance d'un mode de résonance plan, de préférence pour des fréquences de résonance élevées, par exemple supérieures à 40 kHz, ou supérieures à 60 kHz, et/ou
- la deuxième fréquence de résonance peut être choisie pour être une fréquence de résonance d'un mode de résonance hors plan.

[0034] Selon la mise en œuvre ci-dessus, on peut considérer qu'un mode de résonance plan est un mode de résonance dans lequel les différentes parties du spiral ou de l'ébauche de spiral se déplacent principalement dans le plan de pièce au repos. Si ce plan est défini par des directions X et Y, avec une direction Z normale au plan, alors les déplacements en X ou Y sont supérieurs ou égaux aux déplacements en Z. Dans un mode de résonance hors plan, les déplacements en Z sont supérieurs ou égaux aux déplacements en X ou Y, et de préférence les déplacements en Z sont deux à trois fois supérieurs aux déplacements en X ou Y. La demanderesse s'est aperçue qu'une pièce oxydée peut présenter des fréquences de modes de résonance hors plan significativement différentes comparativement aux mêmes pièces non oxydées. En conséquence, pour prédire un coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou un coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral de manière précise, il peut être préférable de prendre en compte un mode de résonance hors plan.

[0035] Selon un mode de réalisation, la première fréquence de résonance peut être inférieure à la deuxième fréquence de résonance et/ou :

- la première fréquence de résonance peut être choisie dans une plage de valeurs allant de 0 Hz à 100 kHz, de préférence de 0 Hz à 50 kHz, plus préférentiellement de 0 Hz à 40 kHz, et très préférentiellement de 10 kHz à 35 kHz, et/ou
- la deuxième fréquence de résonance peut être choisie dans une plage de valeurs allant de 0 Hz à 300 kHz, de préférence de 50 kHz à 250 kHz, plus préférentiellement de 60 kHz à 200 kHz, et très préférentiellement de 100 kHz à 200 kHz. La demanderesse s'est aperçue qu'une pièce oxydée peut présenter des fréquences de modes de résonance significativement différentes comparativement aux mêmes pièces non oxydées pour des fréquences de résonance supérieures à 40 kHz, de préférence supérieures à 50 kHz et très préférentiellement supérieures à 60 kHz. En conséquence, pour prédire un coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou un coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral de manière précise, il peut être préférable de prendre en compte des modes de résonance avec des fréquences de résonance élevées.

[0036] Selon un mode de réalisation, l'étape b. peut consister à identifier une caractéristique d'une fréquence de résonance sensible au coefficient thermique du spiral ou de l'ébauche de spiral.

[0037] Bien entendu, la plage fréquentielle du spectre obtenu ne dépend pas que de la source d'excitation vibratoire mais aussi du capteur de l'instrument de mesure utilisé. Ainsi, la plage fréquentielle est liée à la fois à la plage fréquentielle d'excitation et à la plage fréquentielle sur laquelle l'instrument de mesure de l'amplitude d'oscillation (vibromètre ou autre) est sensible. Cependant, la plage fréquentielle d'excitation sera choisie de sorte à inclure au moins une fréquence de résonance du spiral ou de l'ébauche testé(e).

[0038] La fréquence de résonance prédéterminée que doit présenter le spiral une fois fini peut être une fréquence propre cible ou une fréquence de résonance cible, ou une plage de fréquence propre cible, ou une plage de fréquence de résonance cible définies par une tolérance autour d'une valeur cible.

[0039] Dans le procédé ci-dessus, la caractéristique d'une fréquence de résonance est une caractéristique de la réponse oscillatoire mesurée sur une plage fréquentielle prédéterminée, comprenant au moins une fréquence de résonance. Une telle caractéristique est typiquement identifiée après traitement d'un signal brut de mesure (par exemple mesure des amplitudes ou vitesses ou accélérations de déplacement de certains points du spiral ou de l'ébauche de spiral), le traitement pouvant inclure par exemple une transformée de Fourier pour identifier des pics de résonance et

donc des fréquences de résonance.

[0040] On peut noter que le procédé peut déterminer un coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou un coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral pour opérer un classement de la pièce, et/ou pour prévoir un appairage avec d'autres composants particuliers et/ou pour ensuite calculer / déduire une correction dimensionnelle et/ou un traitement supplémentaire(s) à appliquer pour obtenir un coefficient thermique du module de Young (CTE) cible du spiral et/ou un coefficient thermique (CT) cible d'un système horloger comprenant le spiral. On peut toutefois prendre uniquement en compte la fréquence de résonance identifiée pour directement calculer / déduire une correction dimensionnelle et/ou un traitement supplémentaire(s) à appliquer pour obtenir un coefficient thermique du module de Young (CTE) cible du spiral et/ou un coefficient thermique (CT) cible d'un système horloger comprenant le spiral.

[0041] Selon un mode de réalisation, à l'étape a, la plage fréquentielle est appliquée simultanément à une pluralité de spiraux ou d'ébauches de spiraux. La rapidité est améliorée, car on peut typiquement imposer l'excitation vibratoire à une plaquette supportant plusieurs centaines d'ébauches de spiral, qui seraient par exemple encore attachées à la plaquette.

[0042] Selon un mode de réalisation, la plage fréquentielle est prédéterminée pour englober au moins une plage de fréquences :

- centrée sur la fréquence de résonance prédéterminée, et
- d'une étendue d'au moins 30% de la fréquence de résonance prédéterminée, c'est-à-dire $\pm 15\%$ de la fréquence de résonance prédéterminée. Par exemple, si la fréquence de résonance prédéterminée est de 1 kHz, alors la plage fréquentielle ira de 850 Hz à 1150 Hz.

[0043] Selon un mode de réalisation, le spiral peut présenter au moins deux fréquences de résonance prédéterminées attendues, et la plage fréquentielle est prédéterminée pour couvrir au moins les deux fréquences de résonance prédéterminées attendues. 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.

[0044] Selon un mode de réalisation, l'étape a comprend l'utilisation d'une source, telle qu'une source piézo-électrique, permettant d'induire ou imposer une excitation acoustique sur une tranche d'une plaquette supportant l'ébauche de spiral, ou de manière préférée sur, ou encore sous le spiral ou l'ébauche de spiral à exciter spécifiquement.

[0045] Selon un mode de réalisation, la source acoustique peut être accouplée à un cône d'excitation choisi pour exciter au moins un spiral ou une ébauche de spiral. Préférentiellement, si une plaquette supporte plusieurs ébauches de spiraux, alors la source acoustique peut être accouplée à un cône d'excitation choisi pour exciter au moins une partie et de préférence la totalité des ébauches de spiraux.

[0046] Selon un mode de réalisation, la source acoustique peut être choisie et/ou réglée pour générer l'excitation vibratoire variable au cours du temps pour couvrir la plage fréquentielle prédéterminée :

- avec une amplitude suffisante pour générer des vibrations du spiral ou de l'ébauche de spiral d'amplitude suffisante pour être détectées par le moyen de mesure d'amplitude ou de vitesse ou d'accélération de déplacement d'au moins un point du spiral ou de l'ébauche de spiral et/ou
- pendant une durée suffisante pour en déduire des spectres vibratoires du spiral ou de l'ébauche de spiral.

[0047] Selon un mode de réalisation, l'étape b comprend l'utilisation d'un moyen de mesure optique, tel qu'un vibromètre laser par effet Doppler.

[0048] Selon un mode de réalisation, l'étape b peut être basée sur une mesure au cours du temps d'une amplitude ou d'une vitesse ou d'une accélération de déplacement d'au moins un point du spiral ou de l'ébauche de spiral, effectuée de préférence au moins partiellement pendant l'étape a.

[0049] Selon un mode de réalisation, l'étape b comprend :

- une étape d'identification d'une fréquence de résonance du spiral ou de l'ébauche de spiral en fonction d'une déformée opérationnelle ou modale d'au moins un point du spiral ou de l'ébauche de spiral. Une déformée opérationnelle ou modale est typiquement définie par une amplitude ou vitesse de déplacement ou encore d'une accélération et une direction d'oscillation (hors ou dans un plan particulier) en fonction de la fréquence d'excitation.

[0050] Selon un mode de réalisation, le spiral ou l'ébauche de spiral peut être contenue dans un plan de base, et l'étape b peut comprendre :

- une étape b" de mesure d'une amplitude ou d'une vitesse ou d'une accélération de déplacement d'au moins un point du spiral ou de l'ébauche de spiral selon une direction normale au plan de base, et/ou

- une étape b''' de mesure d'une amplitude ou d'une vitesse ou d'une accélération de déplacement d'au moins un point du spiral ou de l'ébauche de spiral selon une direction contenue dans le plan de base.

[0051] Les mesures de déplacements ou de vitesses selon plusieurs directions permettent de mieux identifier les pics et fréquences de résonance.

[0052] Selon un mode de réalisation, l'étape b. peut comprendre :

- une étape d'identification d'un pic de résonance du spiral ou de l'ébauche de spiral en fonction d'une amplitude ou d'une vitesse de déplacement d'au moins un point du spiral ou de l'ébauche de spiral.

[0053] Selon un mode de réalisation, la caractéristique de la fréquence de résonance peut être identifiée sur la base de la largeur du pic de résonance, à mi-hauteur de la valeur maximale du pic de résonance. Cette méthode de traitement permet de limiter les erreurs de calcul qui pourraient être effectuées en se basant uniquement sur l'identification de la position fréquentielle du pic défini par sa valeur maximale.

[0054] Selon un mode de réalisation, l'étape b comprend une étape de traitement du signal de mesure avec par exemple une transformée de Fourier, pour identifier des pics de résonance d'amplitude de déplacement ou de vitesse ou d'accélération, et/ou de phase, en fonction de la fréquence d'excitation.

[0055] Selon un mode de réalisation, la machine de prédiction de coefficient thermique peut être une machine de calcul pour prédire ou calculer à partir des caractéristiques de fréquence le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral. Autrement dit, la machine de prédiction n'est pas un système régulé ou autorégulé ou à boucle de rétroaction pour ajuster une fréquence de résonance en réponse à une mesure et à une comparaison avec une valeur cible.

[0056] Selon un mode de réalisation, la machine de prédiction de coefficient thermique peut mettre en œuvre une classification effectuée par exemple par un réseau de neurones pour prédire le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral.

[0057] Selon un mode de réalisation, la machine de prédiction de coefficient thermique peut mettre en œuvre une méthode de régression, par exemple une régression linéaire pour prédire le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral.

[0058] Selon un mode de réalisation, la machine de prédiction de coefficient thermique peut mettre en œuvre une classification basée sur un partitionnement en k-moyennes ou en k-médianes pour prédire pour prédire le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral.

[0059] Selon un mode de réalisation, le procédé de contrôle peut comprendre une étape préliminaire consistant à prendre en compte la matière du spiral ou de l'ébauche de spiral, et à ajuster une amplitude maximale de l'excitation vibratoire et/ou une plage de fréquence de la plage fréquentielle prédéterminée en fonction de la matière du spiral ou de l'ébauche de spiral.

[0060] Selon un mode de réalisation, si l'étape c. détermine que le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral est en dehors d'une plage de valeurs attendues, alors le procédé peut comprendre au moins une étape consistant à identifier ou isoler ou retoucher ou mettre au rebut le spiral ou l'ébauche de spiral.

[0061] Selon un mode de réalisation, si l'étape c. détermine que le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral est en dehors d'une plage de valeurs attendues, alors le procédé peut comprendre au moins une étape consistant à définir une étape de traitement du spiral ou de l'ébauche de spiral, telle qu'une étape de thermo-compensation, d'oxydation ou de désoxydation, pour obtenir le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral dans la plage de valeurs attendues

[0062] Selon un mode de réalisation, l'étape a. est effectuée pour une pluralité de spiraux ou d'ébauches de spiraux attachés à une plaquette, et si l'étape c. détermine que le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral est en dehors d'une plage de valeurs attendues pour des premiers spiraux ou premières d'ébauches de spiraux et compris dans la plage de valeurs attendues pour des deuxièmes spiraux ou deuxièmes d'ébauches de spiraux, alors on peut prévoir de détacher uniquement les deuxièmes spiraux ou deuxièmes d'ébauches de spiraux et prévoir une étape de traitement des premiers spiraux ou premières d'ébauches de spiraux, telle qu'une étape de thermo-compensation, d'oxydation ou de désoxydation, pour obtenir le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral dans la plage de valeurs attendues. On peut prévoir de répéter ces étapes, en répétant ou non les étapes a. et b.

[0063] Selon un mode de réalisation, l'étape a et l'étape b sont répétées au moins plusieurs fois pour un même point de mesure du spiral ou de l'ébauche de spiral.

[0064] Selon un mode de réalisation, l'étape a et l'étape b sont synchronisées. Une telle synchronisation procure la possibilité de détecter un déphasage, ou une atténuation, ou un couplage dont la prise en compte peut améliorer la précision de la prédiction, ou permettre de régler ou recalibrer la source d'excitation vibratoire.

[0065] Un deuxième aspect de l'invention peut se rapporter à un procédé de fabrication d'un spiral présentant au moins une fréquence de résonance prédéterminée attendue comprenant les étapes consistant à :

A/ former au moins un spiral ou une ébauche de spiral ayant des dimensions comprises dans des tolérances prédéterminées nécessaires pour obtenir la fréquence de résonance prédéterminée attendue,

B/ contrôler le spiral ou l'ébauche de spiral selon le procédé de contrôle du premier aspect.

[0066] Selon un mode de réalisation, le procédé de fabrication peut comprendre une étape consistant à :

C/ identifier ou isoler ou retoucher ou mettre au rebut le spiral ou l'ébauche de spiral formée lors de l'étape A/, si l'étape c. détermine que le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral est en dehors d'une plage de valeurs attendues.

[0067] Selon un mode de réalisation, l'ébauche de spiral peut être formée sur une plaquette, avec une pluralité d'autres ébauches de spiral.

[0068] Un troisième aspect de l'invention peut concerner un procédé d'apprentissage d'une machine de prédiction pour mettre en œuvre l'étape c. du procédé de contrôle selon le premier aspect, comprenant les étapes consistant à :

i- former des spiraux ou des ébauches de spiraux et leur appliquer une étape de thermo-compensation,

ii- appliquer à chacun des spiraux ou chacune des ébauches de spiral une excitation vibratoire variable au cours du temps pour couvrir une plage fréquentielle prédéterminée,

iii- identifier au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance de chaque spiral ou chaque ébauche de spiral lors de l'application de la plage fréquentielle prédéterminée et enregistrer la température des pièces lors de l'étape ii- et/ou iii-,

iv'- monter une pluralité de spiraux ou d'ébauches de spiral dans un mécanisme oscillant présentant une inertie prédéterminée de sorte à mesurer pour chaque spiral ou ébauche de spiral une fréquence entretenue d'oscillation, et/ou une marche du système horloger formé par, ou comprenant, le mécanisme oscillant à au moins une température prédéterminée et de préférence à au moins deux températures prédéterminées, et/ou

iv"- modéliser dans un outil de simulation une pluralité de spiraux ou d'ébauches de spiral dans un mécanisme oscillant présentant une inertie prédéterminée de sorte à calculer pour chaque spiral ou ébauche de spiral une fréquence entretenue d'oscillation et/ou coefficient thermique d'un système horloger comprenant le spiral et/ou la marche du système horloger comprenant le spiral à au moins une température prédéterminée et de préférence à au moins deux températures prédéterminées,

v- optionnellement, déduire au moins une fréquence de résonance attendue de la fréquence de résonance identifiée à l'étape iii-, et/ou de la fréquence entretenue d'oscillation et/ou de la marche du système horloger mesurée à l'étape iv'- et/ou calculée à l'étape iv"-

vi- déduire un coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral à partir des mesures de l'étape iv'- et/ou des calculs de l'étape iv"-

vii- fournir à la machine de prédiction, et pour chaque spiral ou ébauche de spiral :

- la caractéristique de la fréquence de résonance identifiée à l'étape iii- ;
- optionnellement, la même caractéristique de la fréquence de résonance attendue ;
- la température enregistrée lors de l'étape ii- et/ou iii- ;
- le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral déduit à l'étape vi-.

Brève description des dessins

[0069] D'autres détails de l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description qui suit, faite en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 montre des courbes de dispersion de raideurs non corrigées pour les spiraux sur trois plaquettes différentes,
- la figure 2 montre le centrage de la moyenne des raideurs sur une plaquette autour d'une valeur nominale,
- les figures 3A-3F sont une représentation simplifiée d'un procédé de fabrication d'un résonateur mécanique, ici un spiral, sur une plaquette,
- la figure 4 représente un dispositif permettant l'évaluation du couple d'un spiral,
- la figure 5 représente schématiquement la mise en œuvre de l'évaluation de la raideur d'un spiral par analyse vibratoire,
- la figure 6 représente un exemple de fréquences appliquées à une plaquette de silicium supportant des ébauches de spiral, pour imposer une excitation vibratoire,
- la figure 7 représente un exemple de mesure des amplitudes de déplacement d'un point d'une ébauche de spiral, en réponse à la plage fréquentielle imposée de la figure 6,
- la figure 8 représente en détail un pic de résonance identifié à une fréquence particulière sur la figure 7,
- la figure 9 représente les pics de résonance mesurés et superposés pour la fréquence particulière de la figure 8 pour des pièces testées,
- la figure 10 représente un exemple de modèle de prédiction construit à partir de données extraites de la figure 9,
- la figure 11 montre l'influence de la température sur la fréquence de résonance d'un mode de résonance particulier,
- la figure 12 montre la sensibilité de la fréquence de résonance à l'épaisseur d'oxyde d'un spiral en silicium.

Mode de réalisation de l'invention

[0070] Les figures 3A-3F sont une représentation simplifiée d'un procédé de fabrication d'un résonateur mécanique 100 sur une plaquette 10. Le résonateur est notamment destiné à équiper un organe régulateur d'une pièce d'horlogerie et, selon cet exemple, est en forme d'un ressort spiral 100 en silicium qui est destiné à équiper un balancier d'un mouvement d'horlogerie mécanique.

[0071] La plaquette 10 est illustrée à la figure 3A en tant que wafer SOI (« silicon on insulator ») et comprend un substrat ou « handler » 20 portant une couche d'oxyde de silicium (SiO_2) sacrificielle 30 et une couche de silicium monocristallin 40. A titre d'exemple, le substrat 20 peut avoir une épaisseur de 500 μm , la couche sacrificielle 30 peut avoir une épaisseur de 2 μm et la couche en silicium 40 peut avoir une épaisseur de 120 μm . La couche de silicium monocristallin 40 peut avoir une orientation cristalline quelconque.

[0072] Une étape de lithographie est montrée aux figures 3B et 3C. Par « lithographie », on entend l'ensemble des opérations permettant de transférer une image ou motif sur ou au-dessus de la plaquette 10 vers cette dernière. En se référant à la figure 3B, dans ce mode de réalisation exemplaire, la couche 40 est recouverte d'une couche de protection 50, par exemple en une résine polymérisable. Cette couche 50 est structurée, typiquement par une étape de photolithographie utilisant une source de lumière ultraviolette ainsi que, par exemple, un photo-masque (ou un autre type de masque d'exposition) ou un système de stepper et réticule. Cette structuration par lithographie forme les motifs pour la pluralité de résonateurs dans la couche 50, comme illustrée à la figure 3C.

[0073] Par la suite, dans l'étape de la figure 3D, les motifs sont usinés, notamment gravés, pour former la pluralité de résonateurs 100 dans la couche 40. La gravure peut être effectuée par une technique de gravure ionique réactive profonde (également connue sous l'acronyme DRIE pour « Deep Reactive Ion Etching »). Après la gravure, la partie restante de la couche de protection 50 est subséquentement éliminée.

[0074] A la figure 3E, les résonateurs sont libérés du substrat 20 en retirant localement la couche sacrificielle 30 voire en gravant tout ou partie du silicium du substrat ou handler 20. Un lissage (non illustré) des surfaces gravées peut également avoir lieu avant l'étape de libération, par exemple par une étape d'oxydation thermique suivie par une étape de désoxydation, constituée par exemple de la gravure par voie humide à base d'acide fluorhydrique (HF).

[0075] A la dernière étape du procédé de fabrication à la figure 3F, les spires 110 du résonateur 100 en silicium sont recouvertes d'une couche 120 d'oxyde de silicium (SiO_2), typiquement par une étape d'oxydation thermique pour produire un résonateur thermo-compensé. La formation de cette couche 120, qui a généralement une épaisseur de 2-5 μm , affecte également la raideur finale du résonateur et donc doit être prise en compte lors des étapes précédentes pour obtenir des caractéristiques vibratoires du spiral conduisant à obtenir une fréquence propre particulière du couple spiral-balancier dans un mécanisme de montre donné.

[0076] Comme indiqué ci-dessus, au stade précédent la réalisation de la couche de thermo-compensation, les différents résonateurs formés dans la plaquette présentent généralement une dispersion géométrique importante entre eux et donc une dispersion importante entre leurs raideurs, nonobstant que les étapes de formation des motifs et de l'usi-

nage/gravure à travers ces motifs sont les mêmes pour tous les résonateurs.

[0077] Par ailleurs, cette dispersion de raideurs est encore plus importante entre les spiraux de deux plaquettes gravées à des moments différents même si les mêmes spécifications de procédé sont utilisées.

[0078] Enfin, il faut noter que lors de la fabrication, des défauts de fabrication plus ponctuels peuvent apparaître. Par exemple, lors de l'étape d'usinage de la figure 3D, de la matière peut rester entre deux spires adjacentes. On peut aussi voir des pièces pour lesquelles des résidus de matière sont encore présents entre les spires ou le substrat, au contraire de ce qui est représenté figure 3E. On peut aussi former des ponts de matière entre deux spires adjacentes lors de l'oxydation représentée figure 3F. Enfin, une pollution peut aussi intervenir avec des débris ou particules qui se coincent entre deux spires ou les spires et le substrat. Tous ces défauts affectent fortement le comportement vibratoire et ne peuvent être corrigés en ajoutant ou enlevant de la matière sur l'ensemble des pièces comme il est connu de le faire dans l'art antérieur.

[0079] La description ci-dessus est relative à des résonateurs 100 en silicium, mais on peut envisager de réaliser les résonateurs en verre, en céramique, en nano tubes de carbone, ou encore en métal. On peut en particulier tester des spiraux conventionnels en acier ou détachés de la plaquette. Dans ce cas, le spiral métallique ou détaché de la plaquette est pincé ou pris en référence par un outillage qui le positionne en regard de la source d'émission et de l'appareil de mesure de déplacement.

[0080] De manière connue, la mesure de raideur du spiral peut être effectuée de manière dite statique, c'est-à-dire sans mettre le spiral en oscillation, mais par détermination de son couple. On pourra par exemple se référer au document EP3654111.

[0081] Une alternative à la méthode décrite dans ce dernier document, consiste à effectuer une mesure de couple à l'aide d'un rhéomètre, tel que commercialisé par la société Anton Paar. Un dispositif prévu dans ce but est illustré sur la figure 4. De manière avantageuse, il permet de disposer le spiral 200 à évaluer sur un posage 202, et de le positionner de manière à ce qu'il puisse être fixé au niveau de sa dernière spire par un organe de tenue 204. Une fois la dernière spire fixée, le posage 202 est éloigné du spiral 200 qui est ainsi totalement libre de toute contrainte élastique. La tête du rhéomètre 206 est alors positionnée en regard de la virole du spiral. Elle présente une contreforme de la virole, non circulaire, mais avec une taille réduite, qui permet un engagement de la tête du rhéomètre dans la virole, avec une précision contrôlable, sans entrer en contact du spiral. La tête du rhéomètre est ensuite mise en rotation, dans une direction de contraction du spiral. Lorsque la tête entre au contact de la virole, elle l'entraîne et le rhéomètre mesure le couple exercé par le rappel élastique du spiral, sur un angle donné. Cependant, une telle mesure reste une mesure unitaire et requiert un temps de manipulation important, avec de nombreux risques de casse, pollution...

[0082] La présente invention propose de déterminer au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance d'un échantillon de résonateurs 100 sur la plaquette à l'étape 3F, pour déduire un coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou un coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral et éventuellement à l'étape 3E, pour déduire une raideur et/ou un défaut structural. En particulier, la présente invention propose d'identifier les paramètres ci dessus sans démontage de la plaquette ni mesure dans un sous-ensemble de test, selon une méthode plus performante que les méthodes de l'art antérieur.

[0083] Ainsi, l'invention propose de déterminer au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance d'un échantillon de résonateurs par mesure vibratoire et appliquer une méthode prédictive (par exemple un modèle numérique ou une méthode de classification ou de catégorisation) pour relier le résultat de ladite mesure vibratoire à l'identification du coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou du coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral.

[0084] On exploite ainsi les propriétés modales du spiral attaché à la plaquette. Lors d'une phase d'apprentissage, et par une approche analytique et numérique, il est possible de mettre en place une machine de prédiction en établissant un modèle prédictif reliant le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral à certaines fréquences (fréquence propre ou fréquences de résonance associées à un pic de résonance ou à une largeur à mi-hauteur) spécifiquement choisies.

[0085] Une fois la phase d'apprentissage terminée (une fois les modes à exploiter ainsi que les fréquences d'excitation déterminées), il est possible de passer à une phase de prédiction et d'utiliser la machine de prédiction en exploitant le modèle prédictif pour contrôler les résonateurs d'une plaquette produite, afin de prédire le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral. Le résultat de la prédiction peut être utilisé pour valider des pièces produites, et/ou décider un traitement supplémentaire pour corriger le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral et/ou mettre au rebut des pièces non conformes en termes de coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou de coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral.

[0086] Ainsi, il est possible d'intégrer le procédé de contrôle dans un procédé de fabrication pour obtenir des pièces propres à atteindre, entretenir, générer une fréquence propre d'oscillation particulière et prédéterminée et indépendante des variations de température, une fois les résonateurs chacun accouplés à un balancier d'un mécanisme de montre donné.

[0087] Il est à noter que la machine de prédiction est un dispositif qui permet de prédire, donc de donner ou calculer en avance, à partir d'une ou plusieurs fréquences de résonance mesurées, des valeurs de coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou de coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral, sans accoupler le spiral à un balancier, et sans faire de tests à plusieurs températures. On peut prévoir que la machine de

- se base sur un modèle mathématique (par exemple une loi polynomiale reliant une ou plusieurs fréquences de résonance au coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou au coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral),
- utilise un réseau de neurones pour recevoir en entrée des valeurs ou des graphes tirés des spectres de mesures vibratoires pour donner en sortie un coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou un coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral,
- mette en œuvre un système utilisant de l'intelligence artificielle.

Excitation vibratoire

[0088] La mesure de la réponse vibratoire des résonateurs permet de déduire au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance, comme par exemple une valeur d'une fréquence de résonance. Dans le détail, on doit d'abord imposer une excitation vibratoire à la plaquette. Plusieurs options sont offertes :

a. Mesures dans le domaine fréquentiel :

1- utiliser une source piézo-électrique (ou toute autre source permettant d'induire ou imposer une excitation acoustique) sur la tranche de la plaquette, sur, ou sous l'ébauche de spiral 200 à exciter spécifiquement (préférentiel) qui excite à une fréquence particulière f_0 (excitation mono-fréquentielle continue). Dans cette variante, l'excitation est entretenue.

2- En variante, on peut aussi utiliser la source piézo-électrique (ou toute autre source permettant d'induire ou imposer une excitation acoustique) sur la tranche de la plaquette, sur, ou sous l'ébauche de spiral 200 à exciter spécifiquement (préférentiel) qui excite à une fréquence variable dans le temps pour couvrir une plage fréquentielle prédéterminée, allant par exemple de 0 à 300 kHz, de préférence de 0 à 275 kHz, de préférence de 0 à 250 kHz, de préférence de 5kHz à 250 kHz, et de préférence de 10 à 235 kHz. La totalité de la plage fréquentielle peut être balayée ou couverte dans un intervalle de temps pouvant aller d'une fraction de seconde à quelques secondes. Par exemple, on peut prévoir de balayer ou couvrir la plage de fréquences de la plage fréquentielle en moins de 0.5 s, moins de 1 s, ou moins de 1.5 s. Dans cette variante, la fréquence d'excitation change de manière continue.

b. Mesures dans le domaine temporel : utiliser un marteau d'excitation (ou toute autre source permettant d'induire une excitation acoustique impulsionnelle) sur la tranche de la plaquette, sur, ou sous le spiral à exciter spécifiquement (préférentiel) qui donne une impulsion acoustique la plus courte possible (excitation impulsionnelle multi-fréquentielle). Dans cette variante, l'excitation est ponctuelle et non entretenue.

[0089] Par ailleurs, les mesures peuvent être effectuées en suivant un échantillonnage particulier, par exemple selon une gamme d'échantillonnage de 4, 2 ou 1 Hz. En effet, la résolution pour traiter les données d'acquisition selon par exemple une transformée de Fourier dépend directement de la durée de cette acquisition.

[0090] Par ailleurs, on peut choisir une fréquence d'échantillonnage du signal d'au moins 600 kHz si la plage fréquentielle s'étend jusqu'à 300 kHz par exemple. On peut généralement suivre le théorème de Shannon qui conseille de choisir une fréquence d'échantillonnage supérieure au double de la fréquence maximale présente dans le signal mesuré.

[0091] D'une manière générale, on peut prévoir enfin de changer la direction d'excitation, c'est-à-dire la direction des mouvements imposés par la source (on peut imposer des vibrations selon une ou plusieurs direction(s) axiale(s), et faire évoluer cette ou ces direction(s) dans le temps). Dans le cas où on excite une plaquette comprenant une pluralité de résonateurs, on peut prévoir de régler la direction des vibrations de sorte à pointer sur l'un ou l'autre des résonateurs, en fonctions des mesures d'amplitude de déplacement décrites ci-dessous.

[0092] Enfin, on peut prévoir d'accoupler la source acoustique à un cône divergent dirigé vers les résonateurs à exciter, et de régler la source acoustique pour émettre un signal d'excitation avec une amplitude suffisante pour imposer une excitation vibratoire du ou des résonateurs et ayant une amplitude suffisante pour être détectée et mesurée de manière précise par les instruments de mesure choisis.

Mesure d'amplitude ou de vitesse, ou accélération de déplacement

[0093] Durant l'excitation, on enregistre, via un moyen de mesure adapté, l'amplitude et la phase (par rapport à la source excitatrice) d'oscillation dans les 3 directions X, Y (dans le plan) et Z (hors plan) du spiral excité spécifiquement. De manière non limitative, on peut citer les moyens de mesures possibles suivants :

- Méthodes optiques par interférométrie :

- a. Par effet Doppler 3D (vibromètre laser par effet Doppler),
- b. Holographique,

- Méthodes optiques stroboscopiques,
- Profilométrie confocale chromatique haute résolution temporelle,
- Réflectométrie optique :

- a. Analyse de vibration par déflexion de faisceau sur détecteur multi-cadrans ou caméra,
- b. Analyse par analyse temporelle type TCSPC,

- Méthodes acoustiques par ultrason par effet Doppler.

[0094] La figure 5 représente de manière schématique une plaquette de silicium 25 sur laquelle sont formées une pluralité d'ébauches de spiral 200. Une source d'excitation vibratoire 400 est accouplée à la plaquette 25, de sorte à pouvoir imposer une excitation vibratoire. En conséquence, chaque ébauche de spiral 200 va entrer en vibration, et un vibromètre laser 300, ici focalisé sur un point de l'ébauche de spiral 200 de droite va pouvoir mesurer au cours du temps les amplitudes de vibration du point de mesure. On peut prévoir de mesurer les déplacements selon une direction normale au plan de la plaquette 25, mais on peut tout aussi bien mesurer les déplacements selon une ou plusieurs directions contenues dans le plan de la plaquette 25.

[0095] Une fois un point particulier étudié, on peut déplacer le vibromètre laser 300 sur un autre point de mesure de l'ébauche de spiral 200, ou passer à une autre ébauche de spiral 200 de la plaquette 25. Bien entendu, on peut alternativement déplacer l'ébauche de spiral 200 par rapport au vibromètre laser.

[0096] La figure 6 représente un exemple d'excitation vibratoire au cours du temps. Dans l'exemple donné, la fréquence d'excitation varie au cours du temps, entre 0 Hz et 50 kHz (mais on peut prévoir d'aller jusqu'à 300 kHz), et on peut imposer une succession de fronts montants, chacun espacé d'une période de repos sans excitation. Pour chaque point de mesure sur l'ébauche de spiral 200, on peut imposer une pluralité de front montants (entre 2 fronts montants et 60 fronts montants), chacun durant entre 0.5 s et 2 s par exemple.

Sélection de points de référence à mesurer

[0097] En ce qui concerne la mesure d'amplitude de déplacement, pendant la phase d'apprentissage, on peut prévoir une étape consistant à identifier des points du résonateur pour lesquels la réponse vibratoire est significative. En effet, dans le cas d'un spiral auquel une vibration est imposée, surtout si la fréquence varie au cours du temps, la réponse vibratoire va faire apparaître sur le spiral des nœuds, c'est-à-dire des points particuliers du spiral dont l'amplitude de déplacement est faible ou nulle. Si une mesure de déplacement est effectuée sur un point du spiral qui s'avère être un nœud à une ou plusieurs fréquence(s) particulière(s), l'identification de caractéristiques de fréquences de résonance sera affectée négativement.

[0098] Ainsi, il est avantageux de prévoir une étape préliminaire de mesure de déplacement sur une pluralité de points prédéterminés du spiral, par exemple au moins une dizaine de points prédéterminés, de préférence au moins une vingtaine de points prédéterminés, et très préférentiellement au moins une trentaine de points prédéterminés. On peut prévoir de sélectionner les points prédéterminés agencés sur un repère orthonormé X-Y dans le plan du spiral.

[0099] A l'issue de cette étape préliminaire de mesure d'amplitude sur les points prédéterminés, on peut prévoir d'identifier pour chaque point de mesure des fréquences de résonance, et ensuite une étape de sélection de points de référence pour lesquels la mesure d'amplitude de déplacement au cours de l'excitation montre qu'ils ne sont pas des nœuds à ces fréquences de résonance. Autrement dit, les nœuds identifiés présentent, à au moins une fréquence de résonance, une amplitude de déplacement nulle ou inférieure à une première valeur de pic seuil, et ces points formant des nœuds sont écartés des points de référence à considérer pour les mesures ultérieures. On peut aussi noter que les points de référence sont différents en fonction de la position de l'ébauche de spiral 200 sur la plaquette 25.

[0100] Typiquement, on peut considérer qu'au moins deux points de référence seront sélectionnés, et de préférence au moins quatre points de référence seront sélectionnés. Dans le cas où le résonateur présente un rayon R_a et se

trouve ancré ou encastré sur la plaquette par son extrémité extérieure de pitonnage, on peut sélectionner de préférence quatre points de référence choisis et localisés :

- dans une première zone à moins de $0.20 \times R_a$ (par exemple sur la virole centrale), ou
 - dans une deuxième zone entre $0.05 \times R_a$ et $0.30 \times R_a$ (par exemple sur la deuxième spire en partant de la virole), ou
 - dans une troisième zone entre $0.35 \times R_a$ et $0.65 \times R_a$ (par exemple sur une spire située au milieu du spiral), ou
 - dans une quatrième zone entre $0.65 \times R_a$ et $0.85 \times R_a$ (par exemple sur une spire située aux trois quarts du spiral).
- Ainsi, les points de référence sont éloignés de la partie ancrée sur la plaquette et présentent naturellement une capacité de déplacement oscillatoire importante, ce qui assure une meilleure précision de la mesure de déplacement.

[0101] Par ailleurs, on peut aussi mesurer les déplacements d'un point du corps de la plaquette, et/ou d'un point de la source d'excitation, pour identifier ou mesurer par exemple un décalage de phase ou une atténuation vibratoire, ou encore une résonance issue d'un couplage vibratoire ou bien de la plaquette. Ces mesures complémentaires permettent de s'assurer que les pics identifiés sont bien ceux du spiral seul. On peut également synchroniser la mesure d'amplitude de déplacement et l'excitation vibratoire.

[0102] Alternativement, on peut prévoir de ne mesurer les déplacements / mouvements / vibrations que sur un point particulier situé de préférence sur une zone de la pièce qui ne se déforme pas. En particulier, on peut prévoir de pointer la mesure sur un point de la virole du spiral ou de l'ébauche de spiral. En effet, la virole peut être considérée indéformable lors de l'excitation vibratoire et tous les points de la virole présentent des déplacements / mouvements / vibrations similaires. En conséquence, une petite erreur de localisation du point de mesure sur la virole aura peu de conséquences sur le résultat final. Par ailleurs, en ayant choisi un point particulier de mesure sur la pièce, on peut identifier et choisir une plage de fréquence particulière pour conduire la prédiction de raideur.

[0103] Selon un mode de réalisation dans lequel plusieurs pièces encore attachées à un substrat ou à un outillage sont à tester en série, on peut prévoir :

- une étape de capture d'image des pièces à tester,
- une étape d'analyse de l'image pour par exemple reconnaître chaque type de pièce, et/ou la position de chaque pièce,
- une étape de sélection d'un ou plusieurs points à mesurer pour chaque pièce, et/ou de sélection d'un spectre vibratoire d'excitation à imposer pour chaque pièce et/ou chaque point sélectionné,
- pour chaque pièce à tester, une étape de mise en position du substrat ou de l'outillage supportant les pièces à tester dans un appareil d'excitation vibratoire et de mesure. Selon cette mise en œuvre, on peut automatiser l'excitation et la mesure dans le cas d'une plaquette qui porte encore les ébauches de spiraux :
- une ou plusieurs images de la plaquette sont prises,
- une analyse automatique d'image est effectuée pour connaître au moins la position X-Y de chaque pièce (on peut aussi faire une reconnaissance du type ou modèle de pièce),
- en fonction de la position et/ou du type de pièce reconnues, des points particuliers de mesure préétablis sont identifiés ou sélectionnés (par exemple sur la virole), on peut aussi sélectionner un cycle d'excitation particulier en fonction du type de pièce ou d'un point particulier,
- avec par exemple un outillage qui porte la plaquette et qui comprend une table mobile en X-Y, chaque ébauche de spiral est successivement placée automatiquement en regard de la source d'excitation et de l'appareil de mesure pour être testée en visant le bon point de mesure et en appliquant la bonne spécification d'excitation.

[0104] Selon un mode de réalisation, en fonction du point de mesure sélectionné sur la pièce à tester et/ou en fonction de la fréquence d'excitation, et/ou en fonction du modèle de pièce à tester, on peut prévoir une étape consistant à donner une orientation particulière à la direction d'excitation et/ou à la direction de mesure. A cet effet, on peut choisir une direction d'excitation (ou une direction axiale de la source d'excitation) perpendiculaire à la pièce à tester pour maximiser les déplacements perpendiculaires au plan formé par la pièce au repos. On peut choisir une direction d'excitation (ou une direction axiale de la source d'excitation) inclinée par rapport à la pièce à tester pour maximiser des déplacements contenus dans le plan formé par la pièce au repos. En ce qui concerne la mesure, on peut choisir une direction de mesure (ou une direction axiale d'un faisceau laser de l'appareil de mesure) perpendiculaire à la pièce à tester pour maximiser la précision de mesure des déplacements perpendiculaires au plan formé par la pièce au repos. On peut choisir une direction de mesure (ou une direction axiale d'un faisceau laser de l'appareil de mesure) inclinée par rapport à la pièce à tester pour maximiser la précision de mesure des déplacements contenus dans le plan formé par la pièce au repos.

[0105] Selon un mode de réalisation dans lequel plusieurs pièces sont attachées à un substrat tel qu'une plaquette, on peut prévoir d'effectuer un échantillonnage en détachant une ou quelques pièces pour les tester de manière unitaire, et en déduire une fréquence d'excitation particulière à appliquer, et/ou un point de mesure particulier à utiliser, et/ou un domaine particulier du spectre vibratoire à prendre en compte. Autrement dit, cet échantillonnage préliminaire permet

de tester dans de bonnes conditions des pièces seules (les erreurs de mesure et parasitages sont limités) pour choisir les meilleures conditions de test pour les pièces restées solidaires du substrat.

Détermination des caractéristiques vibratoires

[0106] On a alors plusieurs scénarios en fonction du domaine choisi préalablement pour l'excitation :

a. Mesures dans le domaine fréquentiel

1- variante avec excitation entretenue :

- i. Intégrer temporellement l'amplitude et la phase d'oscillation suffisamment longtemps pour avoir une bonne résolution spectrale à la fréquence d'excitation f_0 ,
- ii. Décaler la fréquence d'oscillation de Δf pour exciter à la fréquence $f_0 + \Delta f$ et répéter l'étape i d'intégration,
- iii. Reconstruire les spectres d'amplitude et de phase d'oscillation en fonction de la fréquence d'excitation (possiblement avec plusieurs pics à plusieurs fréquences).

2- variante avec excitation dont la fréquence varie au cours du temps :

- i. Enregistrer temporellement l'amplitude et la phase d'oscillation au cours du balayage fréquentiel de la plage fréquentielle,
- ii. Répéter l'étape i- au moins une fois, de préférence au moins trois fois,
- iii. Reconstruire les spectres d'amplitude et de phase d'oscillation en fonction de la fréquence d'excitation (possiblement avec plusieurs pics à plusieurs fréquences).

b. Mesures dans le domaine temporel :

- i. Enregistrer le déplacement temporel de la spire selon X, Y et Z sur une durée suffisamment longue de manière à obtenir un signal suffisamment représentatif, comme par exemple quelques secondes.
- ii. On peut choisir d'enregistrer le signal pour en faire un signal de référence à comparer avec d'autres signaux mesurés sur d'autres pièces. On peut aussi choisir de faire un traitement du signal de type transformée de Fourier pour identifier des fréquences de résonance dans le signal enregistré.

[0107] En conséquence, on peut identifier au moins un pic de résonance pour chaque résonateur excité, et il est proposé de déterminer la fréquence de résonance non pas sur la base du sommet du pic de résonance, c'est-à-dire sur l'amplitude maximum, mais plutôt sur une zone de la courbe située entre 25% et 75% de la valeur d'amplitude maximale du pic de résonance, par exemple à partir de sa largeur à mi-hauteur. En effet, cette méthode de traitement qui se focalise sur une partie de la courbe entre 25% et 75% de la valeur d'amplitude maximale du pic de résonance permet de limiter les erreurs dues à la singularité du point d'amplitude maximum et aux calculs d'approximation pour reconstruire la partie sommitale du pic de résonance. La zone de la courbe située entre 25% et 75% de la valeur d'amplitude maximale du pic de résonance présente une meilleure précision que la partie supérieure à 75% (typiquement le pic), ce qui offre une meilleure précision sur la fréquence exacte de résonance déterminée. On peut prendre par exemple le milieu du segment reliant les deux points à mi-hauteur du pic de résonance pour déterminer la fréquence de résonance associée au pic en question.

[0108] La figure 7 représente un exemple de spectre vibratoire pour un point d'une ébauche de spiral 200 de la figure 5 exempte de défauts, reconstruit à partir des mesures d'amplitude de déplacement du point de mesure considéré en réponse à l'excitation vibratoire de la figure 6, entre 10 kHz et 15 kHz. On peut noter la présence de trois pics d'amplitude, à environ 11 kHz, 12.3 kHz, et 13.7 kHz. Bien que cela ne soit pas représenté, on peut typiquement identifier entre 10 et 250 pics d'amplitude si l'excitation vibratoire balaye une plage de fréquence comprise entre 0 Hz et 300 kHz. Chaque pic d'amplitude possède une fréquence de résonance, et les amplitudes maximales varient fortement.

[0109] La figure 8 représente en détail le traitement que l'on peut faire sur un pic d'amplitude pour une pièce exempte de défaut, celui à 11 kHz par exemple. Le but est de trouver la fréquence de résonance et de lui donner une valeur aussi précise que possible. Au lieu de baser ce traitement sur la valeur maximale du pic, la demanderesse s'est aperçue qu'une meilleure précision pouvait être atteinte en déterminant la longueur du segment reliant la partie montante et la partie descendante de la courbe, à mi-hauteur du pic. La fréquence de résonance étant typiquement la valeur au milieu de ce segment. Cependant, on peut effectuer une interpolation sur des points au voisinage du pic de résonance pour améliorer la précision, et décaler le point choisi sur le segment, qui ne sera pas le milieu, en particulier si la position

réelle du pic de résonance est décalée par exemple en raison de la fréquence d'échantillonnage choisie.

[0110] La figure 9 représente, pour l'exemple d'un pic d'amplitude à 10 kHz environ, les pics d'amplitudes construits pour une dizaine d'ébauches de spiral 200 testées. On peut noter que d'une ébauche de spiral à l'autre, la position en fréquence du pic d'amplitude varie (de 9.8 kHz à 10.02 kHz environ), et que l'amplitude maximale de déplacement varie dans un rapport de 1 à 5 environ. Les sommets de pics d'amplitude n'étant pas vraiment symétriques, il peut être judicieux de déterminer la fréquence de résonance sur la base de la largeur du pic à mi-hauteur. On peut aussi utiliser la largeur du pic à mi-hauteur pour déterminer un amortissement, et comparer cet amortissement à une valeur de référence.

[0111] Pour ces essais de la figure 9, on a pu déduire les fréquences de résonance suivantes :

N° spiral	Fréquence résonance (Hz)
2	9824
9	9824
3	9840
8	9840
7	9848
4	9863
10	10020
5	10121
1	10129
6	10148

[0112] En référence au procédé de fabrication décrit aux figures 3A-3F, une première mesure optionnelle peut être effectuée sur les pièces décrites figure 3E pour estimer la raideur des pièces non oxydées, afin de déterminer si une correction dimensionnelle est requise ou non. On pourrait également envisager de faire la première mesure optionnelle après une étape d'oxydation ajoutant une épaisseur pré-déterminée d'oxyde, à partir de laquelle on effectue les éventuelles corrections dimensionnelles. Une fois les pièces oxydées (c'est-à-dire avec un traitement de thermo-compensation), l'invention propose de faire une deuxième mesure pour déterminer un coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou un coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral.

[0113] En conséquence, on décrira d'abord les étapes mises en œuvre pour déterminer la raideur des pièces.

Détermination de la raideur et/ou des dimensions réelles du barreau des résonateurs testés

[0114] Pour établir un modèle de prédiction qui puisse recevoir en entrée les caractéristiques vibratoires (typiquement une fréquence de résonance) et donner en sortie une raideur et/ou une correction dimensionnelle, il faut, lors de la phase d'apprentissage, fournir les données relatives à la raideur et/ou les dimensions du barreau réelles des résonateurs testés. À cet effet, on peut prévoir de mesurer concrètement une fréquence propre d'un système spiral - balancier dans un environnement similaire à celui d'un mécanisme de montre particulier.

[0115] Deux alternatives peuvent être mises en œuvre. On peut selon une première alternative accoupler un balancier prédéterminé directement sur le résonateur encore attaché à la plaquette, et mesurer une fréquence propre d'oscillation du couple résonateur - balancier pour comparer cette fréquence propre avec une fréquence propre attendue et surtout calculer la raideur réelle ou les dimensions réelles en se basant sur les équations 1 à 3 ci-dessus. Selon une deuxième alternative, on peut finir de fabriquer les résonateurs testés, afin de les monter ou les accoupler avec un balancier de manière individuelle pour mesurer ici encore une fréquence propre d'oscillation du couple résonateur - balancier.

[0116] Dans les deux alternatives ci-dessus, on peut passer par une étape intermédiaire de détermination de la raideur de chaque résonateur, et ensuite déterminer les dimensions réelles du barreau des résonateurs testés. En d'autres termes, il est possible de déterminer la fréquence propre ou une fréquence de résonance et ensuite la raideur ou les dimensions du barreau du résonateur en analysant les oscillations libres d'un spiral couplé à un balancier de référence. Dans cette approche, un laser pointé sur les bras du balancier ou sur le porte-spiral enregistre les temps de passage des bras du balancier ou d'un détrompeur. On en déduit alors une estimation de la période, puis de la fréquence et enfin la raideur. Les données recueillies sont essentiellement des nuages de points des instants de passage.

[0117] En effet, pour évaluer la raideur d'un spiral sur le wafer, plusieurs solutions sont offertes, comme notamment

décrit par M. Vermot et al, dans le Traité de construction horlogère (2011) aux pages 178-179. Par exemple, on peut effectuer une évaluation dynamique, en couplant le spiral à un balancier de référence dont on connaît l'inertie. La mesure de la fréquence de l'ensemble permet de déduire la raideur du spiral, de manière précise. Cette évaluation peut être effectuée sur le wafer ou en détachant le spiral de la plaquette. Les références et antériorités données ci-dessus,

[0118] De manière analogue, la raideur peut également être déduite d'une mesure de couple de réaction à la virole au moyen d'un rhéomètre. Le signal acquis représente l'évolution du couple en fonction de l'amplitude. L'analyse de la pente de cette courbe pour les faibles amplitudes (partie linéaire) permet de déduire la raideur, et ensuite les dimensions du barreau du résonateur. On peut ensuite déterminer les dimensions du barreau du spiral.

[0119] D'autre part, on peut prévoir d'estimer par simulation une fréquence propre et/ou une fréquence de résonance et/ou la raideur pour chaque résonateur testé sur la plaquette. À cet effet, on peut effectuer des mesures dimensionnelles de chaque résonateur testé pour reconstruire par modélisation numérique le résonateur afin de simuler par calcul numérique sa réponse vibratoire au spectre imposé, et de trouver par ailleurs la raideur du résonateur.

[0120] Une approche par tomographie 3D par rayon X à haute résolution permettrait d'extraire des nuages de points donnant la densité de matière 3D des spiraux, et, moyennant une reconstruction des images adaptée, une cartographie de la section du spiral. Ces différents types de données permettent de déduire les dimensions du barreau du barreau et d'estimer la raideur du spiral par une approche géométrique.

[0121] Une autre approche consiste à analyser les oscillations forcées d'un spiral sur un balancier de référence avec un échappement. Une mesure laser des temps de passage des bras du balancier (nuages de points), telle que présentée plus haut, permet de mesurer la fréquence et d'en déduire la raideur. Une alternative peut être envisagée à partir d'une acquisition acoustique (micro de type Witschi) qui enregistre les chocs des différentes phases de fonctionnement du système échappement/ancres. Les données mesurées sont soit des nuages de points des instants de passage des bras du balancier, soit l'évolution temporelle du niveau de pression acoustique. Ces types de données expérimentales permettent de déduire la période, puis la fréquence, ensuite la raideur et enfin les dimensions du barreau du résonateur.

[0122] De retour aux essais discutés ci-dessus à la figure 9, une mesure de la raideur a été effectuée en accouplant chaque ébauche de spiral 200 à un balancier de référence, et les raideurs ci-dessous ont pu être déduites :

N° spiral	Raideur mesurée (10^{-7} N.mm)
2	3.89
9	3.88
3	3.92
8	3.90
7	3.91
4	3.95
10	4.111
5	4.135
1	4.119
6	4.196

Établissement du modèle de prédiction

[0123] Pour pouvoir effectuer la prédiction de la raideur, il faut préalablement établir ou construire des données de référence, comme par exemple un spectre de référence. Lors de la phase d'apprentissage, les mesures d'amplitudes d'oscillations sont effectuées sur des résonateurs physiques, et des fréquences de résonance sont identifiées. Afin de pouvoir ultérieurement relier les fréquences de résonance mesurées sur des résonateurs à des raideurs et/ou des corrections de dimension (d'épaisseur) à apporter, il faut prévoir une phase de corrélation au cours de laquelle un modèle prédictif est construit.

[0124] Les opérations décrites ci-dessus (mesures vibratoire, identification des pics de résonance, largeur de bande à mi-hauteur et sa valeur milieu ou corrigée, détermination de la raideur et/ou des dimensions du barreau du barreau) permet d'alimenter une base de données pouvant mettre en relation la position du spiral sur le wafer, des spectres ou périodes d'oscillation ou largeur de bande à mi-hauteur et sa valeur milieu ou corrigée avec les raideurs et/ou dimensions du barreau effectives du spiral. Comme vu ci-dessus, cette base de données peut être construite à partir de simulations

EP 4 310 598 A1

numériques sur un modèle par éléments finis de spiral. Ces simulations permettent de générer des spectres ou périodes d'oscillation de références associés à des raideurs. Cette base de données peut également être complétée par des mesures expérimentales en mesurant des spectres de vibrations, périodes d'oscillation et les positions de spiraux sur la plaquette ainsi que leurs raideurs associées. L'un des avantages de cette approche réside dans le fait que la base de données d'apprentissage s'enrichit au fur et à mesure des essais. Ceci peut permettre d'avoir un modèle adaptatif selon les plaquettes et les spiraux et contribue à la réduction de l'écart-type en raideur sur les plaquettes.

[0125] Cette base de données peut servir à bâtir un modèle de prédiction, et plusieurs solutions sont offertes.

[0126] On peut construire un modèle numérique, par exemple polynomial, pour calculer, en fonction d'une valeur de fréquence de résonance, une épaisseur réelle, une correction dimensionnelle ou une raideur réelle.

[0127] On peut aussi effectuer une catégorisation en effectuant un partitionnement en k-moyennes des données d'entrée (les résultats des mesures vibratoires, typiquement la fréquence des pics de résonance) et des données de sortie (la raideur, et/ou les dimensions du barreau du résonateur) et de les relier entre elles pour établir une correspondance.

[0128] On peut également prévoir de traiter les images des pics de résonance par un réseau de neurones, par exemple un perceptron, pour effectuer une classification selon des raideurs ou des dimensions du barreau, les classes pouvant être définies par des incréments de valeurs.

[0129] En résumé, la phase d'apprentissage comprend une phase de test (excitation de résonateurs avec mesure des caractéristiques vibratoires pour reconstruire un spectre vibratoire et identifier des fréquences de résonance). Une phase de mesure des raideurs et/ou des dimensions du barreau des résonateurs est également effectuée. Une fois les données d'entrée (les fréquences de résonance) et les données de sortie (les raideurs et/ou les dimensions du barreau) pour un échantillon significatif disponibles, la phase de construction du modèle de prédiction peut être effectuée.

[0130] Pour revenir à l'exemple traité et décrit en rapport avec la figure 9, les données collectées sont les suivantes :

N° spiral	Fréquence résonance (Hz)	Raideur mesurée (10^{-7} N.mm)
2	9824	3.89
9	9824	3.88
3	9840	3.92
8	9840	3.90
7	9848	3.91
4	9863	3.95
10	10020	4.111
5	10121	4.135
1	10129	4.119
6	10148	4.196

Une modélisation par régression linéaire a été effectuée sur les données ci-dessus pour les six premières lignes, et la relation ci-dessous a pu être établie :

$$R = 0.0015 F - 10.894,$$

Avec

R pour la raideur en 10^{-7} N.mm

F pour la fréquence de résonance en Hz.

La raideur peut donc être prédite et comparée avec la raideur réelle mesurée comme le montre le tableau ci-dessous, avec pour les six premières lignes les données utilisées pour bâtir ou entraîner la régression linéaire, et pour les quatre dernières lignes, une prédiction uniquement :

N°	F (Hz)	R (10^{-7} N.mm) mesurée	R (10^{-7} N.mm) prédite	écart
2	9824	3.89	3.84	-1.20%
9	9824	3.88	3.84	-1.10%
3	9840	3.92	3.87	-1.40%

(suite)

N°	F (Hz)	R (10 ⁻⁷ N.mm) mesurée	R (10 ⁻⁷ N.mm) prédite	écart
8	9840	3.9	3.87	-0.90%
7	9848	3.91	3.88	-0.70%
4	9863	3.95	3.9	-1.20%
Test				
10	10020	4.111	4.136	0.60%
5	10121	4.135	4.288	3.70%
1	10129	4.119	4.3	4.40%
6	10148	4.196	4.328	3.20%

Une erreur maximale de 4.40% a pu être mesurée, et la figure 10 représente la droite de régression linéaire pour les valeurs des six premières lignes.

[0131] On peut noter qu'il est avantageux de vérifier que le modèle de prédiction établi présente une bonne sensibilité, c'est-à-dire que pour deux valeurs d'entrées différentes, le modèle donne deux valeurs de sortie distinctes. La demanderesse s'est aperçue que la sensibilité du modèle de prédiction n'était pas la même pour tous les pics de résonance. En particulier, si on se réfère à la formule de prédiction établie et représentée figure 10, le coefficient directeur est de 0.0015 10⁻⁷ N.mm/Hz. D'une part, la demanderesse s'est aperçue que le coefficient directeur pouvait être plus grand pour les fréquences de résonance élevées, ce qui procure une meilleure sensibilité de prédiction, pour prédire des valeurs de raideur ou de correction dimensionnelles distinctes, même à partir de valeurs de fréquences de résonance proches. Il est avantageux de prévoir, lors de la phase d'apprentissage, une étape de comparaison de la sensibilité de la prédiction pour vérifier / confirmer qu'il est préférable de considérer et choisir certains pics de résonance aux fréquences élevées (par exemple au-delà de 5 kHz) pour prédire ensuite de manière la plus précise possible une raideur et/ou une correction dimensionnelle en fonction de la réponse vibratoire mesurée.

[0132] D'autre part, la demanderesse s'est aussi aperçue que même pour des fréquences de résonance proches, les modes de résonance (notamment les modes de déformation et/ou de déplacement des résonateurs) pouvaient différer de manière significative, ce qui peut également affecter la sensibilité de la prédiction de raideur et/ou de correction dimensionnelle. Il est avantageux de prévoir, lors de la phase d'apprentissage, une étape de comparaison de la sensibilité de la prédiction pour choisir de considérer ultérieurement telle ou telle fréquence de résonance et pas une autre pour prédire de manière la plus précise possible une raideur et/ou une correction dimensionnelle en fonction de la réponse vibratoire.

[0133] Des remarques ci-dessus relatives à l'étude de la sensibilité de la prédiction, on peut prévoir, lors de la phase d'apprentissage, de classer les différents pics de résonance identifiés selon la sensibilité de prédiction de la raideur et/ou de la correction dimensionnelle. On peut prévoir ensuite de définir la plage fréquentielle d'excitation (qui sera appliquée pendant une phase de prédiction pure) pour inclure au moins un ou plusieurs pics ou fréquences de résonance qui donne(nt) la meilleure sensibilité. Ainsi, imposer une excitation vibratoire variable sur la plage fréquentielle ainsi prédéterminée va garantir de pouvoir faire une prédiction précise pour le pic de résonance identifié ou des prédictions pour chacun des pics de résonance identifiés, qui se recoupent ou se confortent.

[0134] De manière générale, la phase d'apprentissage permet de choisir soit des pics de résonance aux fréquences élevées et/ou des pics de résonance qui correspondent à des modes de résonance particuliers permettant de prédire des valeurs précises et fiables, et la plage fréquentielle sera prédéterminée pour inclure au moins un pic de résonance et de préférence plusieurs, pour pouvoir faire soit une seule prédiction aussi précise que possible, soit plusieurs prédictions (une par pic de résonance jugé intéressant) pour effectuer ensuite des recoupements, des moyennes ou encore des recalages des valeurs prédites.

[0135] On peut par exemple prévoir de prédire plusieurs valeurs de raideur ou de corrections dimensionnelles à partir de plusieurs pics ou fréquences de résonances, et ensuite calculer une valeur définitive, en effectuant, à partir des valeurs prédites, une moyenne pondérée en attribuant des poids à chaque valeur prédite, chaque poids étant déterminé en fonction de la sensibilité identifiée pour chaque pic ou fréquence de résonance correspondant(e).

[0136] Alternativement et de manière préférée, on peut prévoir de n'avoir qu'un seul modèle qui prend tous les pics ou fréquences de résonance en entrée et qui renvoie la raideur ou la correction dimensionnelle, la phase d'apprentissage du modèle servant précisément à calculer les pondérations sur les pics ou fréquences de résonance d'entrée.

Phase de prédiction

[0137] Une fois la phase d'apprentissage terminée, on peut passer à une phase de prédiction, par exemple lors d'un procédé de contrôle de résonateurs. On peut typiquement effectuer le procédé de contrôle sur des ébauches de spiral réalisées sur une plaquette et encore attachées à cette plaquette, de sorte à estimer la raideur et/ou les dimensions du barreau des spiraux de l'échantillon, afin de déterminer si une correction dimensionnelle est à apporter.

[0138] Une fois le modèle entraîné, la procédure de contrôle à déployer peut être la suivante :

- 1) Repérage de la position du spiral sur le wafer, mesure vibratoire des spectres ou période d'oscillation (comme décrit plus haut),
- 2) Prédiction de la raideur et/ou des dimensions du barreau du spiral par application du modèle prédictif,
- 3) Déterminer si une correction dimensionnelle est nécessaire pour atteindre la fréquence propre ou raideur cible.

[0139] Lors du procédé de contrôle, il est possible aussi de quantifier la correction exacte à apporter, de sorte que le procédé de fabrication peut inclure, en plus du contrôle ci-dessus :

- 1) Connaissant la raideur effective du spiral estimée(s) selon le modèle et la raideur cible et/ou les dimensions du barreau cibles : appliquer la dose de correction nécessaire.
- Réitérer l'étape 1) et l'étape 2) du procédé de contrôle pour contrôler la raideur / les dimensions du spiral et confirmer que les valeurs cibles sont atteintes, à un seuil de tolérance près, ou répéter ces étapes et la correction dimensionnelle jusqu'à ce que la raideur/dimension prédite par le modèle atteigne les valeurs cibles.

Échantillonnage

[0140] On sait qu'on réalise plusieurs centaines de spiraux sur une plaquette et que les dimensions du barreau des spiraux réalisés peuvent varier selon les régions de la plaquette. Si l'évaluation de raideur peut être effectuée sur un seul spiral, en pratique, elle sera effectuée sur un échantillon de spiraux, répartis sur la plaquette.

[0141] A partir des évaluations effectuées, les corrections peuvent être effectuées pour toute la plaquette de manière homogène, ou bien différenciées par région, si les résultats obtenus varient d'un spiral à un autre. On peut ainsi réduire l'écart-type de la dispersion des raideurs. Par ailleurs, si on connaît les raideurs de tous les spiraux par application du modèle, on peut déterminer la correction optimale permettant de réduire la dispersion globale.

[0142] On peut même envisager d'aller jusqu'à une évaluation de tous les spiraux de la plaquette, notamment avec une évaluation vibratoire, car celle-ci est très rapide à effectuer et peut permettre une automatisation du procédé.

[0143] Bien que les exemples ci-dessus ont été donnés principalement sur la base d'une fabrication de spiraux présentant des dimensions du barreau initiales plus grandes que les dimensions du barreau cibles, on peut également prévoir de réaliser des spiraux présentant des dimensions du barreau initiales plus petites que les dimensions du barreau cibles. L'étape de correction consiste alors à ajouter de la matière, comme par exemple décrit dans le document EP3181939 susmentionné.

[0144] La méthode, consistant à identifier des fréquences de résonance en imposant une excitation vibratoire sur les ébauches de spiral seules permet de rapidement obtenir des données de mesure, sans devoir par exemple faire des opérations de montage d'un balancier, tout en limitant les erreurs de mesure car seule l'ébauche de spiral est testée (il n'y a pas d'erreur pouvant être liée au balancier, comme sa masse, sa position de montage, etc.).

Prédiction du coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou du coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral

[0145] Pour le volet relatif à la prédiction du coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou du coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral, on peut procéder de la manière suivante :

- Étape 1 : mesures ou calculs des fréquences propres ou de résonance sur plaquette à plusieurs températures T (par exemple 8°C, 23°C et 38°C) ;
- Étape 2 : détacher les spiraux, les assembler avec un balancier et les monter dans des mouvements ;
- Étape 3 : mesurer les coefficients thermiques (CT) en mouvement selon la procédure du Contrôle officiel suisse des chronomètres (COSC) par exemple (24h à 8°C, 24h à 23°C et 24h à 38°C) ;
- Étape 4 : construire un modèle de prédiction entre les fréquences propres ou de résonance mesurées à l'étape 1 et les coefficients thermiques (CT) du mouvement mesurés à l'étape 4.

[0146] Lors de l'étape 1, il peut être difficile de faire la mesure vibratoire pour plusieurs températures. On peut envisager

de faire la mesure vibratoire pour une seule température (par exemple 23°C, température de la salle blanche) puis de construire un modèle numérique capable d'estimer l'évolution des fréquences propres avec la température selon la procédure suivante :

- Construire un modèle par éléments finis de spiral avec une couche d'oxyde de silicium ;
- Attribuer les paramètres matières pertinents et leurs évolutions avec la température ;
- Faire une analyse modale sur l'intervalle de température [8°C 38 °C] ;
- Tracer l'évolution des fréquences propres ou de résonance en fonction de la température et pour différentes épaisseurs de couche d'oxyde.

[0147] Avec ces lois d'évolution, il devient possible prédire les fréquences propres voulues à partir d'une unique mesure vibratoire expérimentale effectuée à 23°C. Toutefois, on pourrait imaginer différents systèmes de chauffage en étuve ou par conduction pour identifier ces lois de manières expérimentales.

[0148] Le résultat d'une telle prédiction peut être observé figure 11, où les fréquences de résonance d'un même mode de résonance (le numéro x parmi par exemple 240 modes de résonance identifiés) sont représentées pour trois températures distinctes T1, T2, T3. On peut constater une différence de valeur de la fréquence du pic de résonance entre les trois températures.

[0149] Par ailleurs, la demanderesse s'est aperçue que la fréquence de résonance était significativement affectée par des valeurs d'oxydation différentes (impliquant des variations de coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et donc des variations de coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral) pour certains modes de résonance seulement.

[0150] Dans le détail, une analyse de sensibilité de la fréquence de résonance à la valeur d'oxydation a été effectuée pour environ 240 modes de résonance identifiés avec l'équation ci-dessous :

[équation 6]

$$S = \frac{Var [E [Y|Xi]]}{Var [Y]}$$

[0151] La figure 12 montre que la sensibilité de la fréquence de résonance à l'épaisseur de couche d'oxyde pour prédire le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral (courbe CT) augmente pour certains modes de résonance à partir du 100^{ème} mode de résonance identifié environ. On peut conclure qu'il est avantageux de prendre en compte les modes de résonance qui ont des fréquences de résonance élevées pour prédire le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral. Par contre, la même figure 12 montre que la sensibilité de la fréquence de résonance à l'épaisseur de couche d'oxyde et/ou au ratio épaisseur de l'âme en silicium vs épaisseur d'oxyde de silicium, pour prédire la raideur (courbe R) diminue pour certains modes de résonance à partir du 100^{ème} mode de résonance identifié environ. On peut conclure qu'il est avantageux de prendre en compte les modes de résonance qui ont des fréquences de résonance faibles pour prédire la raideur du spiral.

[0152] Par ailleurs, la demanderesse s'est aperçue que pour les modes de résonance ayant une fréquence élevée, la sensibilité de la fréquence de résonance est particulièrement élevée pour les modes de résonance dits « hors plan », alors que les modes de résonance dits « plan » ne présentent pas de sensibilité particulière. On peut conclure qu'il est avantageux de prendre en compte les modes de résonance « hors plan » et qui ont des fréquences de résonance élevées pour prédire le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral. A l'inverse, il est avantageux de considérer les modes de résonance « plan » pour prédire la raideur des pièces.

[0153] L'étape 3 peut être réalisée en détachant les pièces mesurées à l'étape 1 et en les montant dans un mouvement de référence, et on peut mesurer la marche de ces mouvements selon les trois températures 8°C, 23°C, 38°C.

[0154] Pour établir un modèle de prédiction de coefficient thermique qui puisse recevoir en entrée les caractéristiques vibratoires et donner en sortie le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral, on peut donc utiliser les données de fréquence de résonance identifiées aux trois températures pour les pièces prises en compte, et les données de marche aux trois températures pour ces mêmes pièces.

[0155] Une fois le modèle de prédiction de coefficient thermique établi, une machine de prédiction de coefficient thermique peut l'utiliser pour prédire, à partir par exemple des données de fréquence de résonance pour un mode de résonance hors plan ayant une fréquence de résonance élevée, le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral. Bien entendu, lorsqu'il s'agit de

prédire le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral, la machine de prédiction de coefficient thermique peut recevoir en entrée la référence du dispositif horloger en question, ou sa valeur ou contribution au coefficient thermique. On peut en effet considérer que pour une référence de calibre donnée, les différents paramètres qui interviennent dans le CT du mouvement (sensibilité à la température du balancier, du rouage, des paliers, des lubrifiants...) sont constants et ne constituent pas des variables d'ajustement.

[0156] Il n'y a plus besoin d'assembler des mouvements pour mesurer le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral, cette étape chronophage et source de variabilité peut être supprimée.

[0157] Il y aurait la possibilité de faire un traitement itératif sur des pièces d'une même plaquette : après prédiction du coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou du coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral, on pourrait détacher uniquement les pièces ayant les performances voulues, et appliquer une nouvelle étape de thermo-compensation (oxydation et/ou désoxydation) aux pièces qui sont identifiées non compatibles ou non conformes aux performances désirées.

[0158] En résumé, l'invention permet de simplifier les processus de fabrication et de contrôle de résonateurs en silicium pour fabriquer des mouvements ayant une sensibilité aux variations de température faible ou nulle :

- en appliquant une excitation vibratoire particulière à des pièces oxydées,
- en fournissant la réponse vibratoire ou des fréquences de résonance ou des pics de résonance ou des données extraites de la réponse vibratoire à une machine de prédiction de coefficient thermique. Avec ce procédé, on peut vérifier simplement si les pièces ont une thermo-compensation adaptée au mouvement dans lequel elles seront montées.

On peut retenir que l'on peut aussi, de manière optionnelle, à une étape précédente de fabrication (avant thermo-compensation ou oxydation par exemple) effectuer une excitation vibratoire particulière et soumettre la réponse vibratoire ou des fréquences de résonance ou des pics de résonance ou des données extraites de la réponse vibratoire à une machine de prédiction de raideur ou de présence de défaut structurels comme par exemple :

une ou plusieurs spires collée(s) ou pontée(s) à une spire adjacente, au reste de la plaquette, comme par exemple le support isolant,
 une porosité, locale ou non, du matériau ou de l'oxyde,
 une interface entre une âme en silicium et une couche d'oxyde avec un vide, un décollement, des irrégularités...,
 une épaisseur d'oxyde irrégulière ou interrompue...,
 un défaut ou manque local de matière, comme par exemple un défaut d'infiltration,
 un surplus de matière, lié par exemple à un défaut de masquage,
 une hétérogénéité de la matière (le silicium, l'oxyde de silicium),
 un défaut de planéité (lissage) des tranches latérales du barreau formant le spiral,
 un défaut de verticalité des tranches latérales du barreau formant le spiral (une dépouille ou une contre dépouille des faces),
 des spires déformées, ondulées ou décentrées par rapport à la position théorique...

[0159] Cependant, on peut noter que les données tirées de la réponse vibratoire et exploitées pour ces prédictions de raideur ou de présence de défauts ne sont pas forcément les mêmes que celles pour la prédiction de coefficient thermique et on peut même considérer que de manière préférée, les données tirées de la réponse vibratoire et exploitées sont différentes et distinctes de celles pour la prédiction de coefficient thermique.

Revendications

1. Procédé de contrôle d'un spiral ou d'une ébauche de spiral agencée pour former un spiral, le procédé de contrôle comportant les étapes suivantes :

- a. appliquer au spiral ou à l'ébauche de spiral une excitation vibratoire variable au cours du temps pour couvrir une plage fréquentielle prédéterminée,
- b. identifier au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance du spiral ou de l'ébauche de spiral, telle qu'un pic de résonance, lors de ou en réponse à l'excitation vibratoire sur la plage fréquentielle prédéterminée,
- c. soumettre à une machine de prédiction de coefficient thermique la caractéristique de fréquence de résonance identifiée à l'étape b. pour déterminer un coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou un coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral.

2. Procédé de contrôle selon la revendication 1,

dans lequel l'étape b. comprend :

- b1. une première étape d'identification comprenant l'identification d'une première caractéristique d'une première fréquence de résonance telle qu'un premier pic de résonance,
- b2. une deuxième étape d'identification comprenant l'identification d'une deuxième caractéristique d'une deuxième fréquence de résonance telle qu'un deuxième pic de résonance, la deuxième fréquence de résonance étant différente de la première fréquence de résonance,

et dans lequel l'étape c. comprend :

- c1. une première étape de prédiction consistant à soumettre à une autre machine de prédiction la première caractéristique de la première fréquence de résonance pour déterminer un paramètre différent du coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou du coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral, tel qu'une raideur ou un défaut du spiral ou de l'ébauche de spiral,
- c2. une deuxième étape de prédiction consistant à soumettre à la machine de prédiction de coefficient thermique la deuxième caractéristique de la deuxième fréquence de résonance pour déterminer le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral.

3. Procédé de contrôle selon la revendication 2,

dans lequel les étapes b1 et b2 sont séparées par une étape d'oxydation,

et dans lequel l'étape a. comprend :

- a1. une première étape d'excitation vibratoire, effectuée avant l'étape b1. et consistant à appliquer au spiral ou à l'ébauche de spiral une première excitation vibratoire variable au cours du temps pour couvrir une première plage fréquentielle prédéterminée,
- a2. une deuxième étape d'excitation vibratoire, effectuée avant l'étape b2. et consistant à appliquer au spiral oxydé ou à l'ébauche de spiral oxydée une deuxième excitation vibratoire variable au cours du temps pour couvrir la première plage fréquentielle prédéterminée ou une deuxième plage fréquentielle prédéterminée.

4. Procédé de contrôle selon la revendication 2,

dans lequel l'étape a. est mise en œuvre après une étape d'oxydation,

et dans lequel les étapes b1. et b2. prennent en compte la même réponse vibratoire du spiral ou de l'ébauche de spiral.

5. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 2 à 4, dans lequel :

- la première fréquence de résonance est choisie pour être une fréquence de résonance d'un mode de résonance plan, et/ou
- la deuxième fréquence de résonance est choisie pour être une fréquence de résonance d'un mode de résonance hors plan.

6. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 2 à 5, dans lequel la première fréquence de résonance est inférieure à la deuxième fréquence de résonance et/ou :

- la première fréquence de résonance est choisie dans une plage de valeurs allant de 0 Hz à 100 kHz, de préférence de 0 Hz à 50 kHz, plus préférentiellement de 0 Hz à 40 kHz, et très préférentiellement de 10 kHz à 35 kHz, et/ou
- la deuxième fréquence de résonance est choisie dans une plage de valeurs allant de 0 Hz à 300 kHz, de préférence de 50 kHz à 250 kHz, plus préférentiellement de 60 kHz à 200 kHz, et très préférentiellement de 100 kHz à 200 kHz.

7. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 6, le spiral présentant au moins deux fréquences de résonance

prédéterminées attendues, dans lequel la plage fréquentielle est prédéterminée pour couvrir au moins les deux fréquences de résonance prédéterminées attendues.

8. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel l'étape b est basée sur une mesure au cours du temps d'une amplitude ou d'une vitesse ou d'une accélération de déplacement d'au moins un point du spiral ou de l'ébauche de spiral, effectuée de préférence au moins partiellement pendant l'étape a.

9. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 8, le spiral ou l'ébauche de spiral étant contenue dans un plan de base, dans lequel l'étape b comprend :

- une étape b" de mesure d'une amplitude ou d'une vitesse ou d'une accélération de déplacement d'au moins un point du spiral ou de l'ébauche de spiral selon une direction normale au plan de base, et/ou
- une étape b'" de mesure d'une amplitude ou d'une vitesse ou d'une accélération de déplacement d'au moins un point du spiral ou de l'ébauche de spiral selon une direction contenue dans le plan de base.

10. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 8 ou 9, dans lequel l'étape b. comprend :

- une étape d'identification d'un pic de résonance du spiral ou de l'ébauche de spiral en fonction d'une amplitude ou d'une vitesse de déplacement d'au moins un point du spiral ou de l'ébauche de spiral.

11. Procédé de contrôle selon la revendication 10, dans lequel la caractéristique de la fréquence de résonance est identifiée sur la base de la largeur du pic de résonance, à mi-hauteur de la valeur maximale du pic de résonance.

12. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 11, dans lequel la machine de prédiction de coefficient thermique met en œuvre une méthode de régression, par exemple une régression linéaire, pour prédire le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral.

13. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 11, comprenant une étape préliminaire consistant à prendre en compte la matière du spiral ou de l'ébauche de spiral, et à ajuster une amplitude maximale de l'excitation vibratoire et/ou une plage de fréquence de la plage fréquentielle prédéterminée en fonction de la matière du spiral ou de l'ébauche de spiral.

14. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 13, dans lequel, si l'étape c. détermine que le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral est en dehors d'une plage de valeurs attendues, alors le procédé comprend au moins une étape consistant à identifier ou isoler ou retoucher ou mettre au rebut le spiral ou l'ébauche de spiral.

15. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 13, dans lequel, si l'étape c. détermine que le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral est en dehors d'une plage de valeurs attendues, alors le procédé comprend au moins une étape consistant à définir une étape de traitement du spiral ou de l'ébauche de spiral, telle qu'une étape de thermo-compensation, d'oxydation ou de désoxydation, pour obtenir le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral dans la plage de valeurs attendues

16. Procédé d'apprentissage d'une machine de prédiction pour mettre en œuvre l'étape c. du procédé de contrôle de l'une des revendications 1 à 15, comprenant les étapes consistant à :

- i- former des spiraux ou des ébauches de spiraux et leur appliquer une étape de thermo-compensation,
- ii- appliquer à chacun des spiraux ou chacune des ébauches de spiral une excitation vibratoire variable au cours du temps pour couvrir une plage fréquentielle prédéterminée,
- iii- identifier au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance de chaque spiral ou chaque ébauche de spiral lors de l'application de la plage fréquentielle prédéterminée et enregistrer la température des pièces lors de l'étape ii- et/ou iii-,

- iv'- monter une pluralité de spiraux ou d'ébauches de spiral dans un mécanisme oscillant présentant une inertie prédéterminée de sorte à mesurer pour chaque spiral ou ébauche de spiral une fréquence entretenue d'oscillation ou une marche du système horloger formé par, ou comprenant, le mécanisme oscillant à au

moins une température prédéterminée et de préférence à au moins deux températures prédéterminées, et/ou

iv"- modéliser dans un outil de simulation une pluralité de spiraux ou d'ébauches de spiral dans un mécanisme oscillant présentant une inertie prédéterminée de sorte à calculer pour chaque spiral ou ébauche de spiral une fréquence entretenue d'oscillation et/ou un coefficient thermique d'un système horloger comprenant le spiral et/ou la marche du système horloger comprenant le spiral à au moins une température prédéterminée et de préférence à au moins deux températures prédéterminées,

v- optionnellement, déduire au moins une fréquence de résonance attendue de la fréquence de résonance identifiée à l'étape iii-, et/ou de la fréquence entretenue d'oscillation et/ou de la marche du système horloger mesurée à l'étape iv'- et/ou calculée à l'étape iv"-

vi- déduire un coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral à partir des mesures de l'étape iv'- et/ou des calculs de l'étape iv"-

vii- fournir à la machine de prédiction, et pour chaque spiral ou ébauche de spiral :

- la caractéristique de la fréquence de résonance identifiée à l'étape iii- ;
- optionnellement, la même caractéristique de la fréquence de résonance attendue ;
- la température enregistrée lors de l'étape ii- et/ou iii- ;
- le coefficient thermique du module de Young (CTE) du spiral et/ou le coefficient thermique (CT) d'un système horloger comprenant le spiral déduit à l'étape vi-.

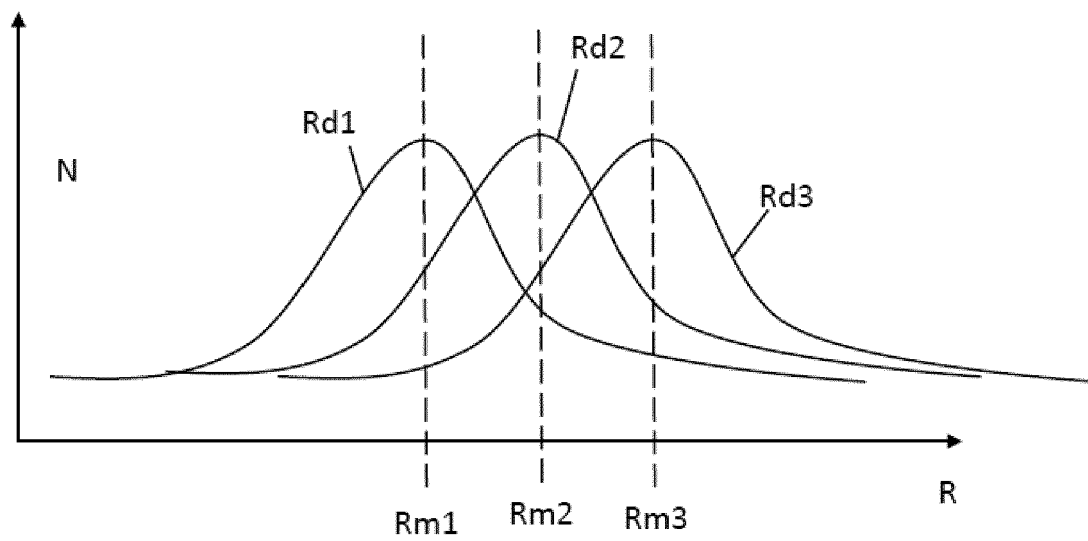


FIG. 1

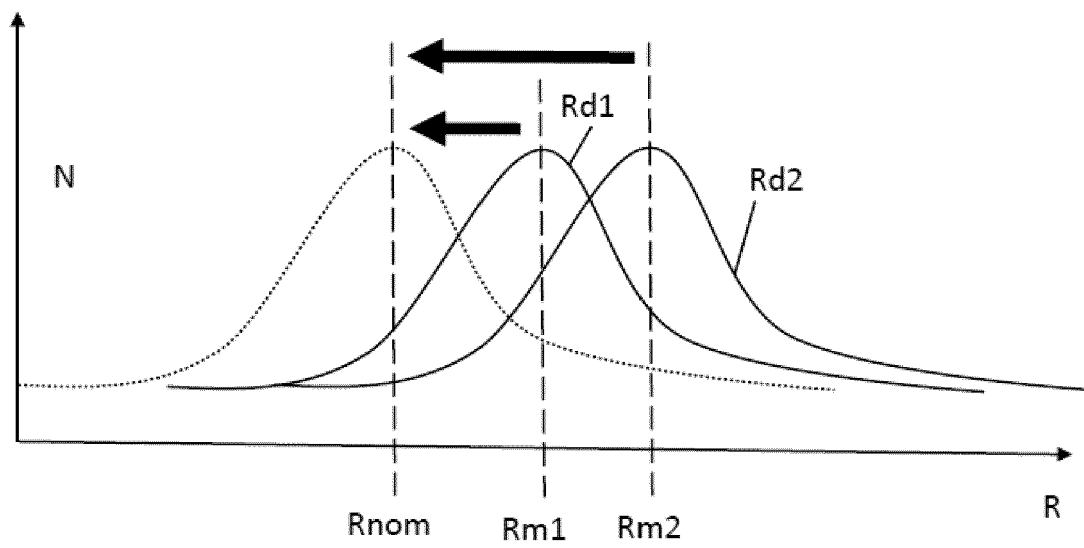


FIG. 2

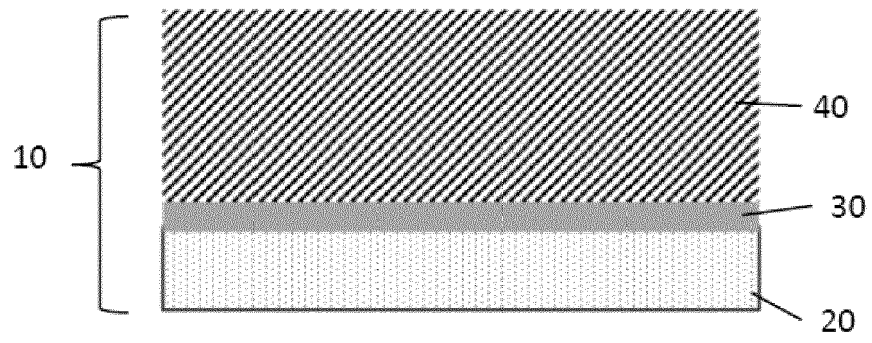


FIG. 3A

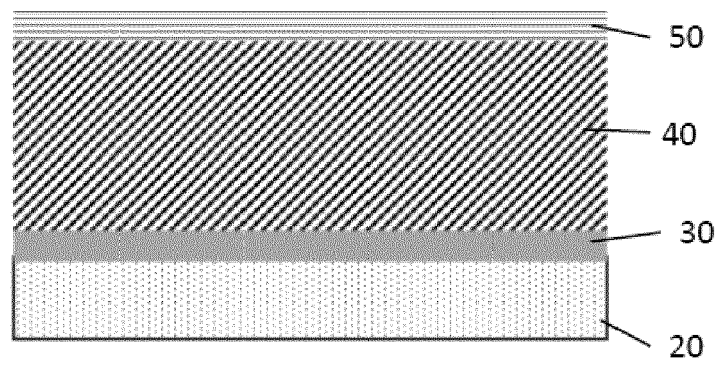


FIG. 3B

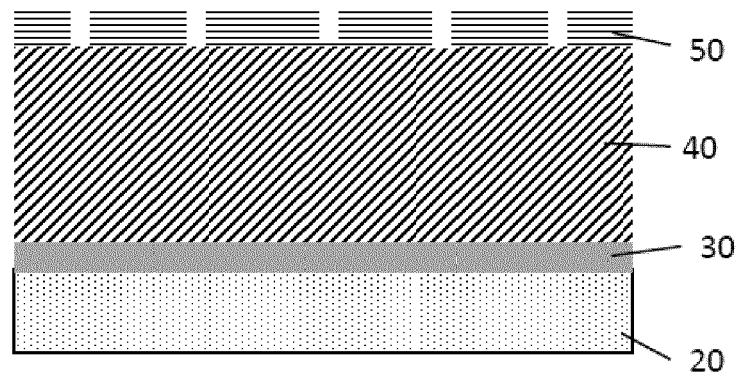


FIG. 3C

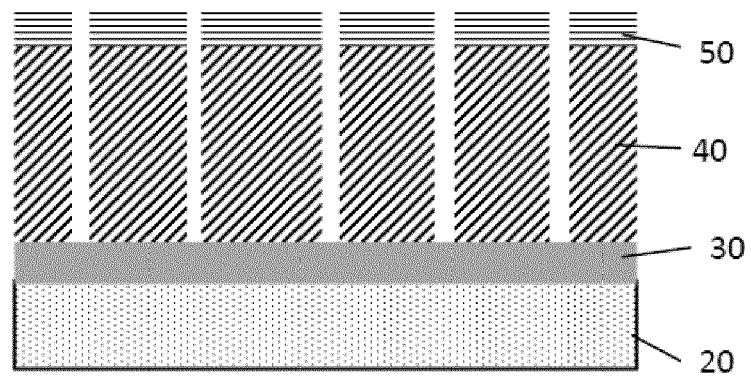


FIG. 3D

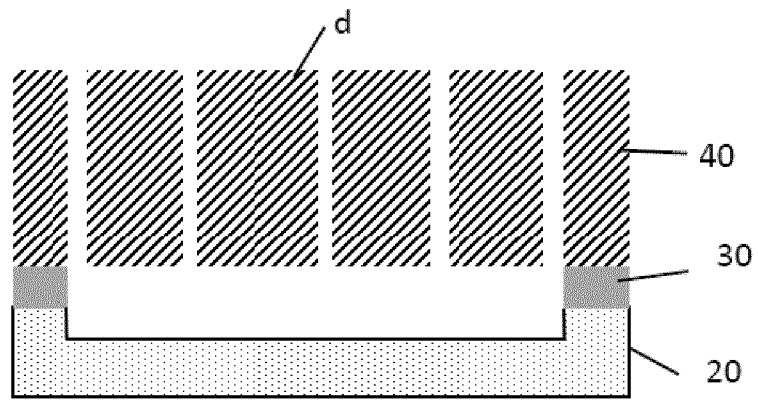


FIG. 3E

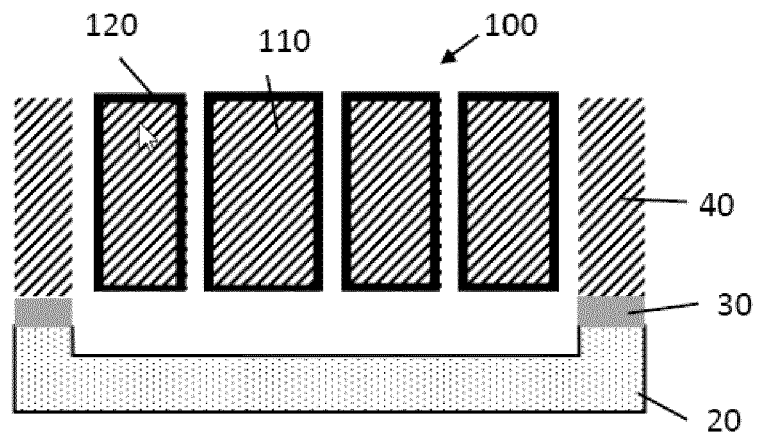


FIG. 3F

Fig. 4

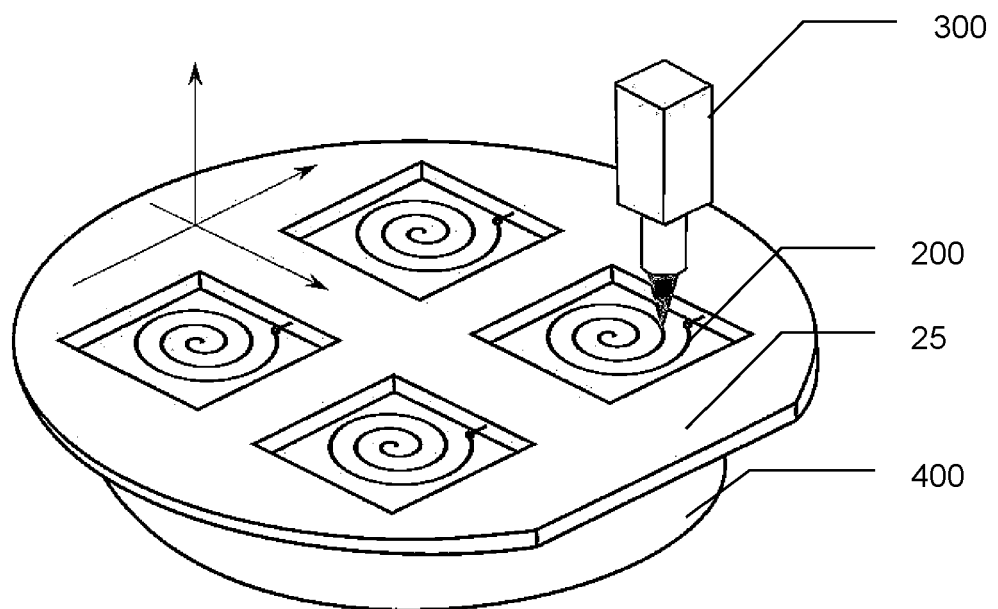
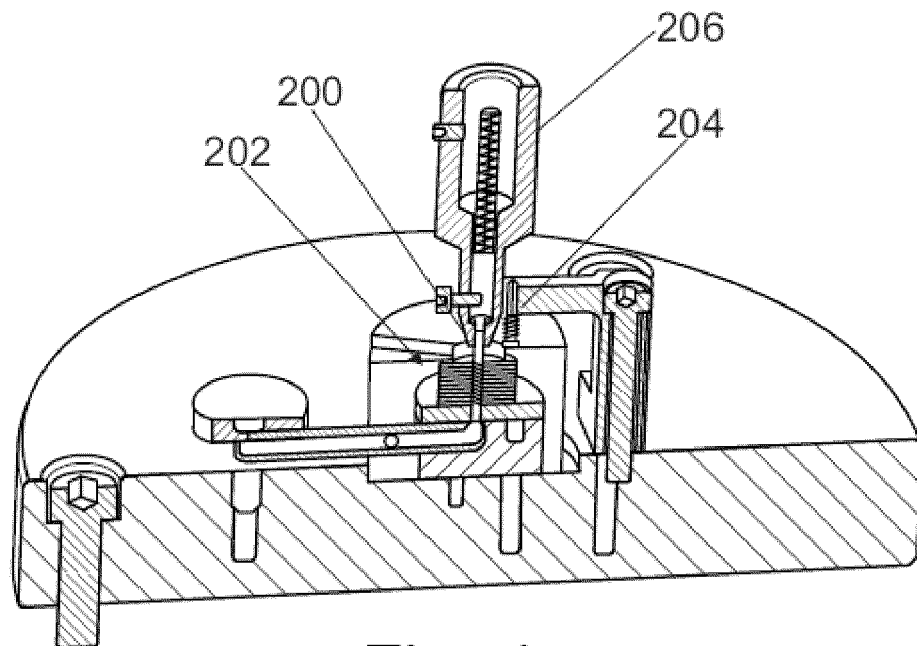


Fig. 5

Fig. 6

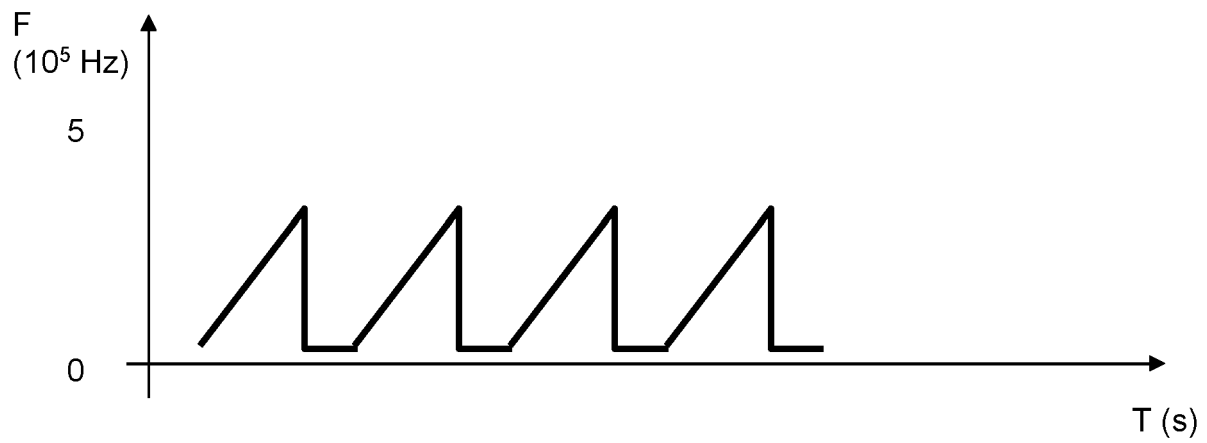


Fig. 7

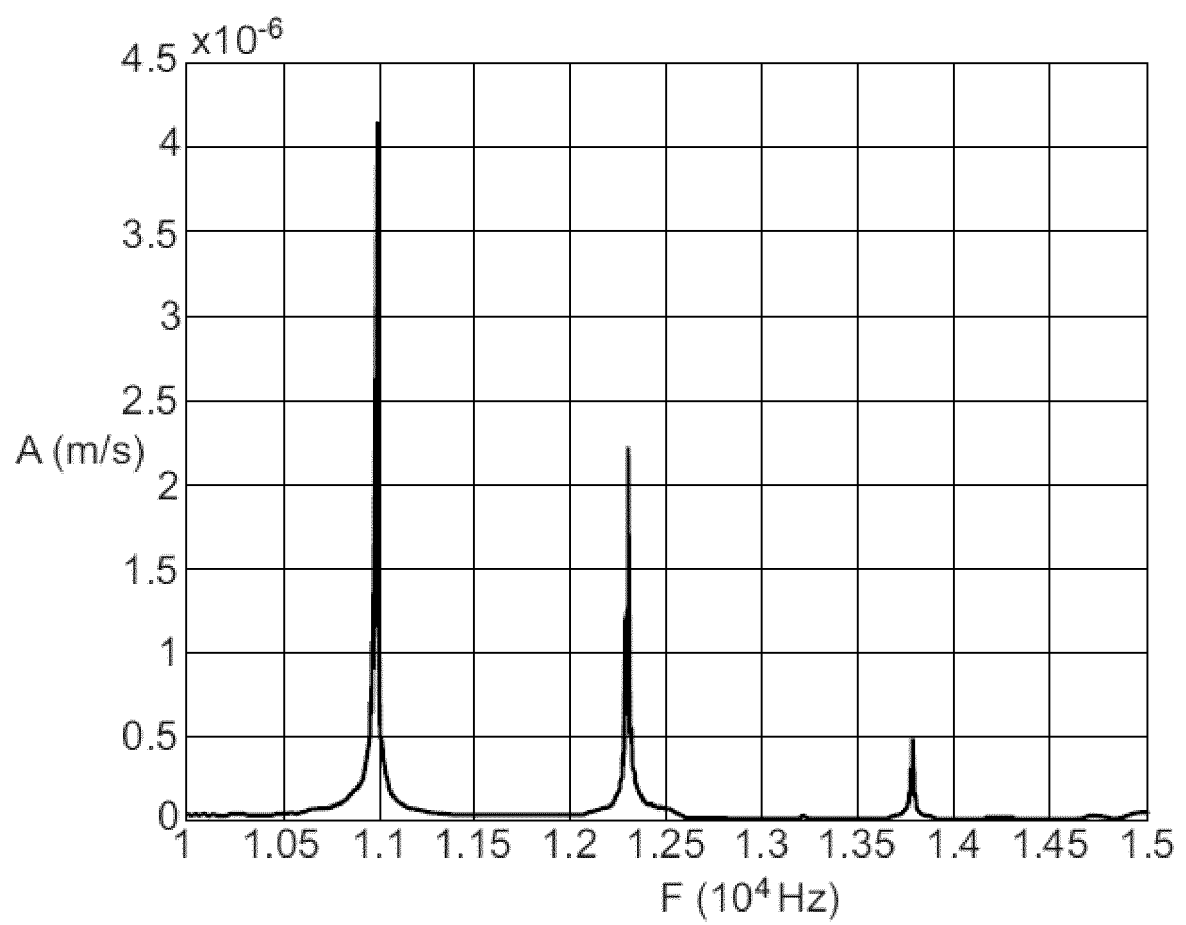


Fig. 8

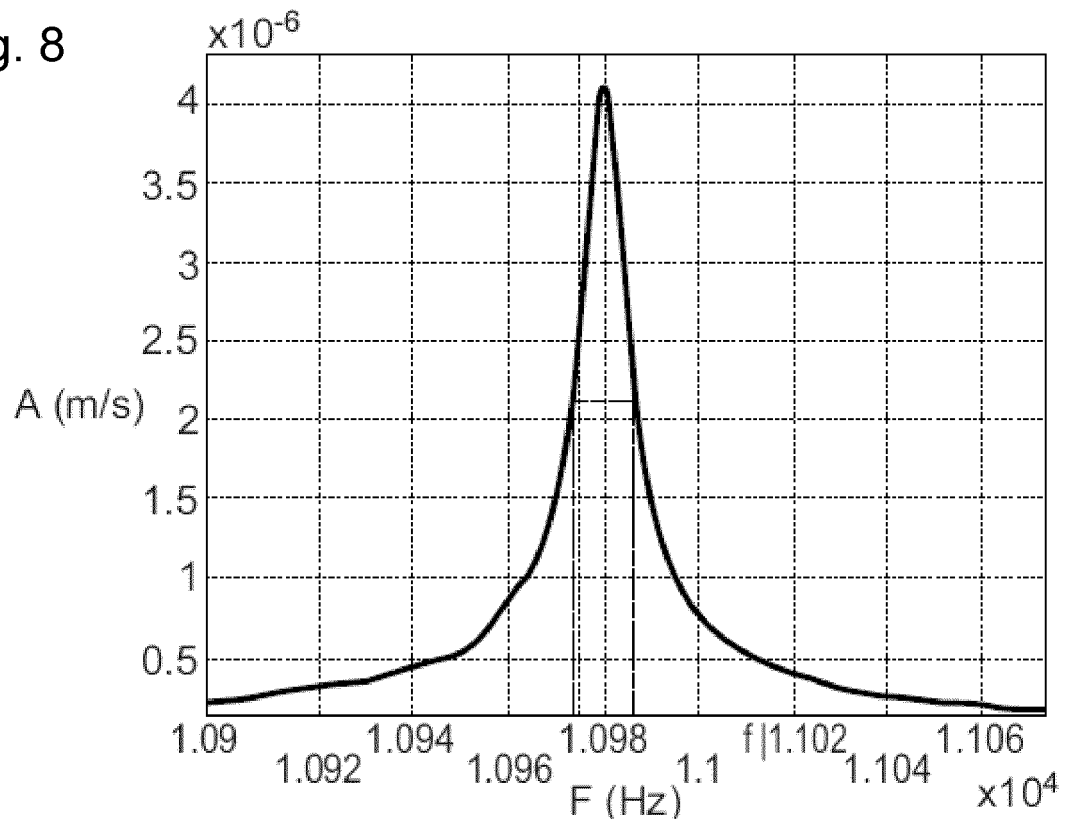


Fig. 9

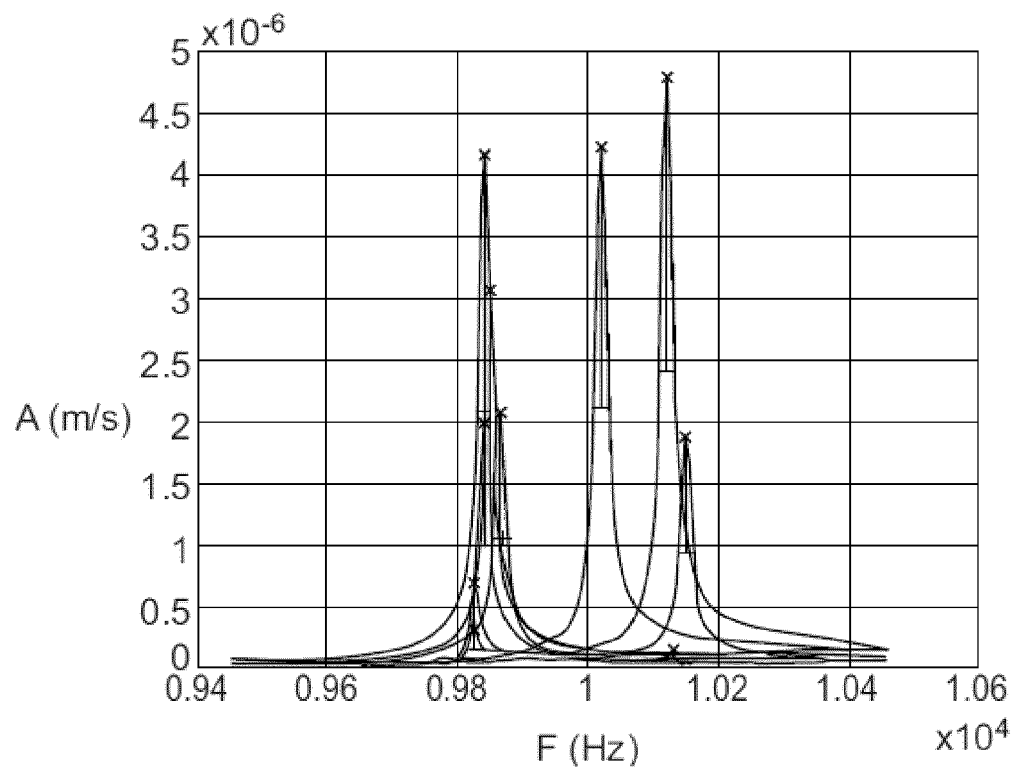


Fig. 10

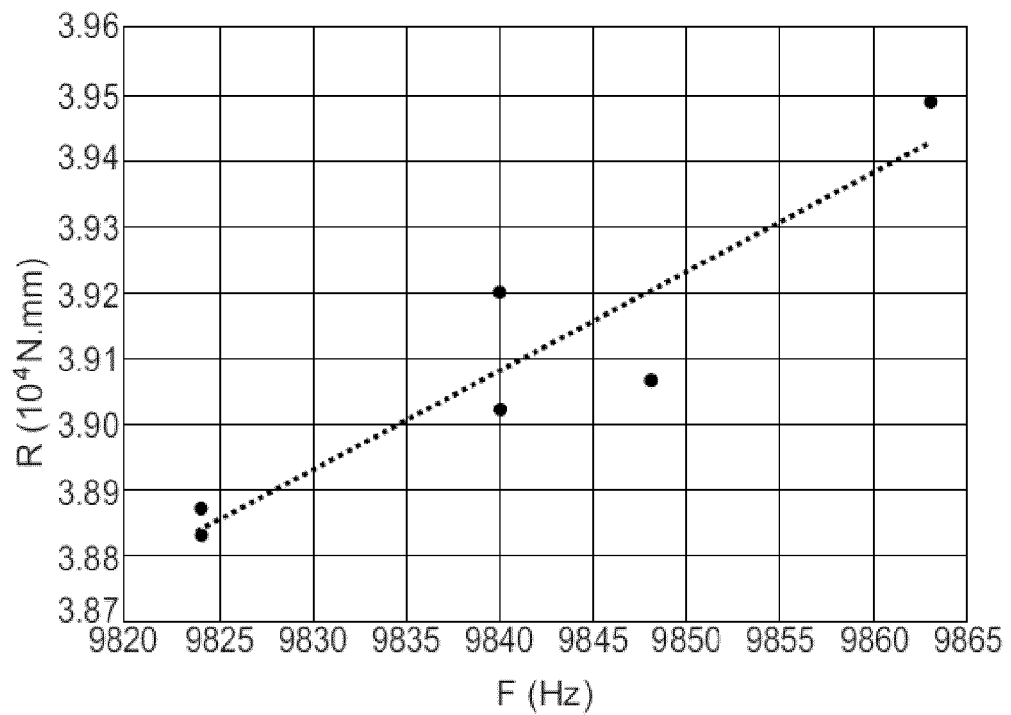


Fig. 11

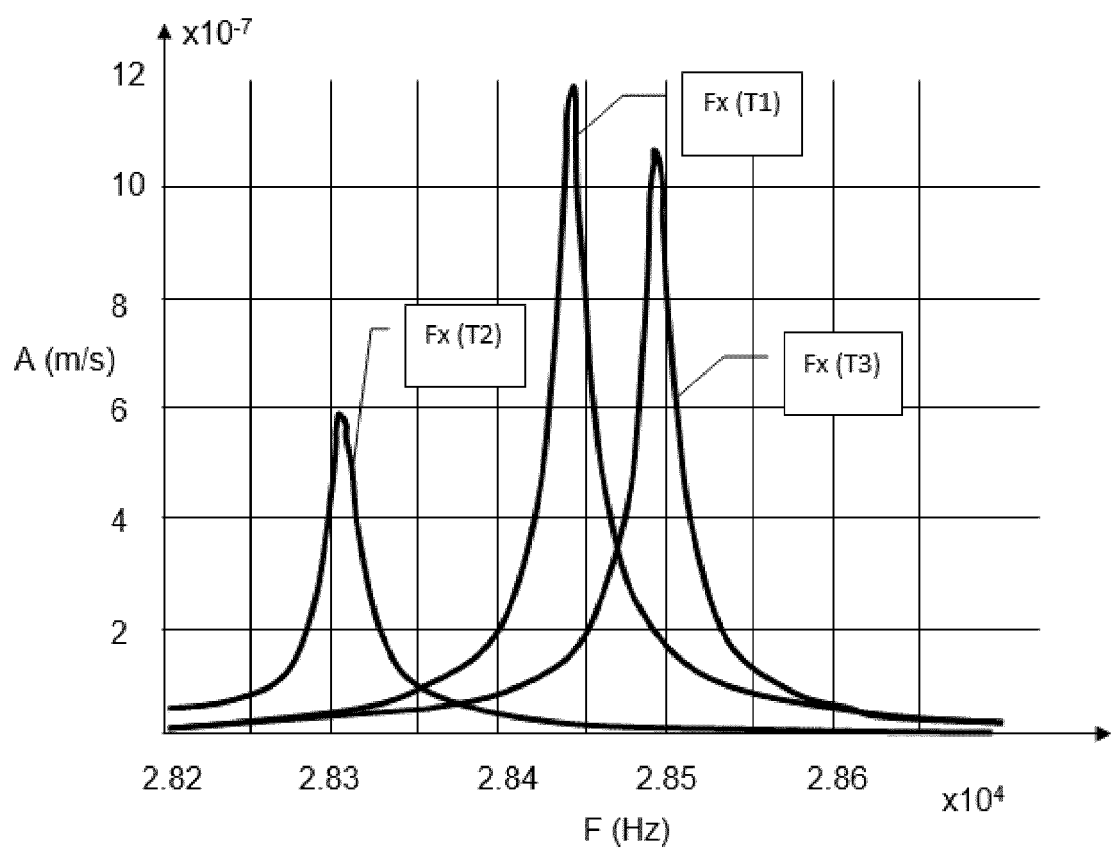
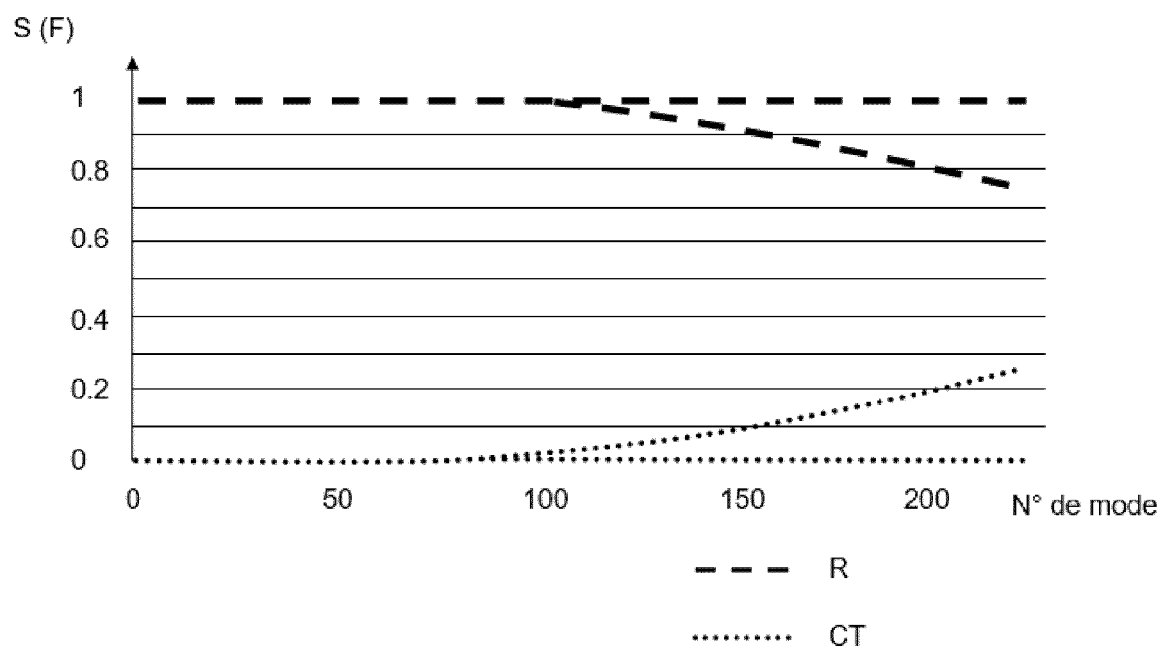


Fig. 12





RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 22 18 5552

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
A	JP 6 486697 B2 (CITIZEN HOLDINGS CO LTD) 20 mars 2019 (2019-03-20) * alinéas [0091] - [0103] * -----	1-16	INV. G04B17/06 B81C1/00 G04D7/10 G04D7/12
A	CN 103 105 769 A (TIANJIN SEA GULL WATCH GROUP) 15 mai 2013 (2013-05-15) * alinéas [0012] - [0020] * -----	1-16	
A	EP 3 845 770 A1 (SIGATEC SA [CH]) 7 juillet 2021 (2021-07-07) * alinéas [0137], [0094] * -----	1-16	
A	CH 281 496 A (SMITH & SONS LTD S [GB]; FURZEHILL LAB LIMITED [GB]) 15 mars 1952 (1952-03-15) * page 1, ligne 51 - page 2, ligne 30 * * page 3, lignes 71-87 * -----	1-16	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
			G04B G04D B82B B81C
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
La Haye		18 novembre 2022	Cavallin, Alberto
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES			
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet 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	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

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

EP 22 18 5552

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.

18-11-2022

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
JP 6486697 B2	20-03-2019	JP 6486697 B2	20-03-2019
		JP 2015179067 A	08-10-2015

CN 103105769 A	15-05-2013	AUCUN	

EP 3845770 A1	07-07-2021	CH 716603 A1	31-03-2021
		EP 3845770 A1	07-07-2021
		EP 3915788 A1	01-12-2021

CH 281496 A	15-03-1952	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 1422436 A [0012]
- EP 2215531 A [0012]
- WO 2016128694 A [0012]
- WO 2015113973 A [0016]
- EP 3181938 A [0016]
- EP 3181939 A [0016] [0143]
- EP 3654111 A [0080]

Littérature non-brevet citée dans la description

- **M. VERMOT et al.** *Traité de construction horlogère*, 2011, 178-179 [0117]