



DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:
28.06.2023 Bulletin 2023/26

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):
G04D 7/10 (2006.01) G04D 7/12 (2006.01)
G04B 17/06 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **21216760.5**

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

(22) Date de dépôt: **22.12.2021**

(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:
• **GACHET, David**
2000 Neuchâtel (CH)
• **SOOBBARAYEN, Kevin**
25300 Pontarlier (FR)
• **TOBENAS, Susana**
2017 Boudry (CH)

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

(74) Mandataire: **Vigand, Philippe et al**
Novagraaf International SA
Chemin de l'Echo 3
1213 Onex - Genève (CH)

(54) **PROCÉDÉ DE CONTRÔLE 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 spiral devant présenter au moins une fréquence de résonance prédéterminée attendue, 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 la caractéristique de fréquence de résonance identifiée à l'étape b. pour déterminer si un défaut affecte le spiral ou l'ébauche de spiral.

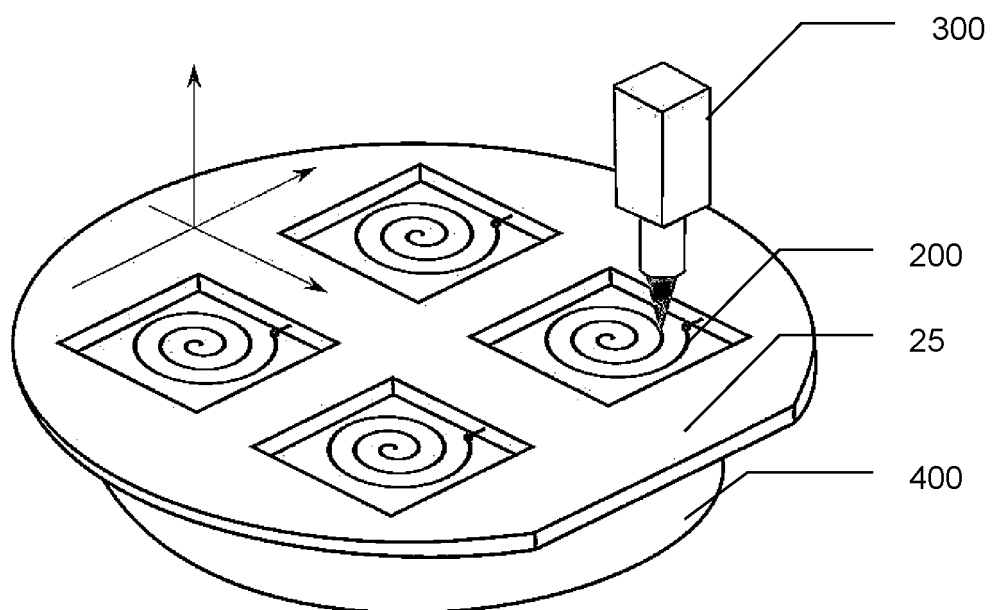


Fig. 5

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 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 régulateur 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 montre et dépend notamment de la raideur du spiral.

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 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 nœud 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 :

40 [équation 2]

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

45 avec :

φ , l'angle de torsion du ressort, et

50 M , le couple de rappel du ressort spiral,

où 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] 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.

[0007] 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. 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.

[0008] 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.

[0009] 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.

[0010] 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.

[0011] 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.

[0012] 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 $Rm3$.

[0013] 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 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.

[0014] De cette manière, comme le démontre la figure 2, nonobstant la raideur moyenne R_{m1} , R_{m2} , etc. des raideurs sur une plaquette donnée, la courbe de dispersion de raideurs R_{d1} , R_{d2} , etc. peut-être recentrée par rapport à une valeur de raideur nominale R_{nom} .

[0015] Par contre, on peut noter que la fabrication de spiraux sur une plaquette peut générer sur quelques spiraux des défauts qui entraînent de fortes variations de comportement vibratoire par rapport à un comportement normalement attendu. En particulier, il peut arriver que des spires restent en contact ou sont collées entre elles. On peut aussi noter des phénomènes de pontage entre spires par des impuretés, ou encore que des parties d'un spiral restent en contact avec d'autres parties de la plaquette. Bien évidemment, ces phénomènes affectent fortement le comportement vibratoire et peuvent être considérés comme des défauts de fabrication qui rendent un ou plusieurs spiraux d'une même plaquette, impropres à une utilisation dans un mécanisme de montre. De plus, il faut noter que ces défauts ne sont pas aisés à corriger, et mènent même généralement à devoir mettre au rebut la pièce en cause. En particulier, les corrections fines évoquées ci-dessus (création d'une couche d'oxyde, ajout ou retrait de matière sur toute la pièce) ne peuvent pas être utilisées pour corriger des tels défauts ponctuels de collage, de pontage de la pièce ou de ses spires entre elles ou avec la plaquette qui les supporte.

[0016] 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 détection plus aisée ou rapide des spiraux de la plaquette qui présentent des défauts rédhibitoires pour une utilisation dans un mécanisme de montre.

Divulguation de l'invention

[0017] 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 spiral devant présenter au moins une fréquence de résonance prédéterminée attendue, 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 la caractéristique de fréquence de résonance identifiée à l'étape b. pour déterminer si un défaut affecte le spiral ou l'ébauche de spiral.

[0018] Le procédé selon la mise en oeuvre ci-dessus comprend une étape consistant à identifier une caractéristique indicative d'un défaut notable affectant le spiral ou l'ébauche en cause. Par exemple, si une divergence identifiée dans le spectre de fréquences vibratoires obtenu est supérieure à un seuil prédéterminé, alors il est déterminé que le spiral ou l'ébauche en cause est inutilisable dans un mécanisme de montre. Ainsi, le procédé, avec une simple mesure de spectre vibratoire obtenu en réponse à une excitation vibratoire, permet de détecter si un défaut affecte le spiral ou l'ébauche de spiral de manière significative au point de rendre la pièce inutilisable et impossible à retoucher. Une telle mesure (effectuée sur des pièces finies ou d'ébauche unitaires ou « nues » ou « brutes », c'est-à-dire par exemple sans traitement de finition ou de surface, et/ou pas encore assemblées) permet d'identifier des défauts sur les pièces sans faire d'analyse d'aspect, ou de mesure unitaire, avant même de les détacher de la plaquette et/ou de les monter dans un mécanisme oscillant, ce qui permet d'économiser du temps et des ressources. Autrement dit, encore au stade du wafer, on peut catégoriser les spiraux ou les ébauches en une première catégorie de pièces utilisables ou possibles à retoucher, et en une deuxième catégorie de pièces défectueuses à mettre par exemple au rebut.

[0019] Le procédé selon la mise en oeuvre ci-dessus comprend une étape d'excitation vibratoire du spiral ou de l'ébauche de spiral, l'identification d'une fréquence de résonance, pour en déduire ensuite par prédiction si un défaut affecte le spiral ou l'ébauche. 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, ce qui apporte au moins des avantages de gain de productivité (pas de montage avec un système oscillant),

des gains de qualité (pas de pollution des pièces), un gain de précision (pas d'erreur liée à d'autres composants d'un système oscillant).

[0020] 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). 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 le 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.

[0021] On peut aussi noter que s'il est déterminé qu'il faut isoler ou mettre au rebut la pièce testée en raison d'un défaut, cela peut se faire sur la pièce unitaire sans redémonter quoique ce soit.

[0022] 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 identification des défauts à un stade avancé de la fabrication est possible. Le procédé selon la mise en oeuvre ci-dessus permet tout aussi bien de tester des spiraux terminés pour par exemple effectuer une vérification finale de conformité.

[0023] 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).

[0024] 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.

[0025] 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.

[0026] En particulier, la caractéristique identifiée peut être une valeur de fréquence de résonance, une largeur d'un pic de résonance, une amplitude d'un pic de résonance, la présence ou l'absence d'un pic de résonance, la forme d'un pic de résonance (pics rapprochés, avec plusieurs inversions de pente...). L'identification du défaut se base donc sur la comparaison entre :

- une caractéristique (fréquence de résonance, largeur d'un pic de résonance, amplitude d'un pic de résonance, présence ou l'absence d'un pic de résonance, forme d'un pic de résonance ...) tirée du spectre de fréquences de vibrations du spiral ou de l'ébauche obtenu en réponse à l'excitation vibratoire,
- la même caractéristique (fréquence de résonance, largeur d'un pic de résonance, amplitude d'un pic de résonance, présence ou l'absence d'un pic de résonance, forme d'un pic de résonance ...) tirée d'un spectre de référence, qui peut être un spectre construit à partir de pièces étalonnées, de moyennes de tests, et/ou de simulations ou calculs numériques.

[0027] Selon un mode de réalisation, l'étape c. comprend au moins une étape de comparaison d'un spectre de fréquences vibratoires du spiral ou de l'ébauche de spiral obtenu en réponse de l'étape a. avec un spectre de référence, de sorte à déterminer si la caractéristique identifiée à l'étape b. est une caractéristique anormale divergeant d'une différence prédéterminée avec la même caractéristique de la fréquence de résonance prédéterminée attendue

[0028] Selon la mise en oeuvre ci-dessus, en réponse à l'étape d'excitation vibratoire du spiral ou de l'ébauche de spiral, la mesure d'une réponse vibratoire du spiral ou de l'ébauche, et la détection d'une caractéristique anormale d'une fréquence de résonance par comparaison du spectre de fréquences vibratoires obtenu avec un spectre de référence, permet de déduire ensuite par prédiction si un défaut affecte le spiral ou l'ébauche.

[0029] 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.

[0030] 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.

[0031] Selon un mode de réalisation, le spiral présente 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.

[0032] 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.

[0033] 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.

[0034] 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.

[0035] Selon un mode de réalisation, le défaut affectant le spiral ou l'ébauche de spiral est un défaut modifiant des modes de résonance attendus, et l'étape c. comprend une étape consistant à rechercher un pic de résonance anormal entre deux pics de résonance attendus et normalement adjacents ou consécutifs. La demanderesse s'est aperçue que des défauts de spires collées, de manque de matière, d'impuretés liant des spires entre elles, ou autres, peuvent conduire le spiral ou l'ébauche à présenter des modes de résonances que l'on ne constate pas sur des spiraux conformes. Le procédé s'intéresse donc à identifier la présence de pics de résonance normalement absents du spectre de fréquence attendu. Si le défaut provoque la génération de nouveaux modes de résonance, alors le procédé permettra de le détecter, même si les autres pics de résonance sont corrects.

[0036] Selon un mode de réalisation, le défaut affectant le spiral ou l'ébauche de spiral est un défaut atténuant ou amplifiant des modes de résonance attendus, et l'étape c. comprend une étape consistant à rechercher un pic de résonance anormal d'une amplitude différente d'au moins 30% d'une amplitude attendue d'un pic de résonance attendu. La demanderesse s'est aperçue que des défauts de spires collées, de manque de matière, d'impuretés liant des spires entre elles peuvent conduire le spiral ou l'ébauche à présenter des modes de résonances notablement différents de ceux que l'on peut constater sur des spiraux conformes. Le procédé s'intéresse donc à quantifier des différences d'amplitudes des pics de résonance dans le spectre de fréquence obtenu avec les mêmes pics de résonance dans le spectre de référence. Alternativement, on peut calculer une aire du pic de résonance obtenu et la comparer à une aire d'un pic de résonance du spectre de référence et déclarer qu'il y a un défaut si les aires présentent une différence de par exemple 30%.

[0037] Selon un mode de réalisation, le procédé comprend une étape d. consistant à catégoriser le défaut identifié à l'étape c. Par exemple, si la caractéristique anormale est la présence d'un pic de résonance inattendu, ou si la caractéristique anormale est une forte atténuation d'un pic de résonance attendu, alors la machine de prédiction peut identifier et différencier le défaut d'un autre pour catégoriser les pièces défectueuses. Les catégories de défauts pouvant être par exemple des spires collées, un défaut de matière, ou encore un contact imprévu entre l'ébauche et le reste de la plaquette.

[0038] Selon un mode de réalisation, 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.

[0039] 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.

[0040] Selon un mode de réalisation, le spiral ou l'ébauche de spiral est contenue dans un plan de base, et 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.

[0041] Les mesures de déplacements ou de vitesses selon plusieurs directions permettent de mieux identifier les pics et fréquences de résonance.

[0042] Selon un mode de réalisation :

- pour une première fréquence de résonance prédéterminée, seule l'étape b' de mesure d'un déplacement ou d'une vitesse d'au moins un point du spiral ou de l'ébauche de spiral selon une direction normale au plan de base est effectuée, et/ou
- pour une deuxième fréquence de résonance prédéterminée, seule l'étape b" de mesure d'un déplacement ou d'une vitesse d'au moins un point du spiral ou de l'ébauche de spiral selon une direction contenue dans le plan de base est effectuée.

[0043] Selon la fréquence de résonance, on peut choisir de mesurer dans une direction ou dans une autre, pour mesurer les plus grands déplacements ou vitesses possibles, de sorte à minimiser l'erreur de mesure. En effet, en fonction de la géométrie du spiral ou de l'ébauche de spiral, le mode de vibration (typiquement la direction de vibration) en réponse à l'excitation vibratoire peut varier.

[0044] Selon un mode de réalisation, 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.

[0045] Selon un mode de réalisation, 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. 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.

[0046] Selon un mode de réalisation, la machine de prédiction met en œuvre une classification effectuée par exemple par un réseau de neurones pour prédire si un défaut affecte le spiral ou l'ébauche de spiral.

[0047] Selon un mode de réalisation, le procédé comprend 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.

[0048] Selon un mode de réalisation, la plage fréquentielle s'étend sur une plage de fréquence 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. La demanderesse s'est aperçue que la précision de la prédiction était meilleure pour les pics ou fréquences de résonance situées sur une plage de fréquences élevées. En effet, si on s'attache à la raideur, son influence sur la fréquence de résonance est plus forte dans des gammes de fréquences hautes (par exemple entre 10 kHz à 35 kHz), si bien que la sensibilité et la précision sont meilleures sur cette plage particulière.

[0049] 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.

[0050] Selon un mode de réalisation, si l'étape c. détermine qu'un défaut affecte le spiral ou l'ébauche de spiral, 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.

[0051] Un deuxième aspect de l'invention se rapporte 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.

[0052] Selon un mode de réalisation, le procédé de fabrication comprend une étape consistant à :

C/ identifier ou isoler ou retoucher ou mettre au rebut le spiral ou l'ébauche de spiral formé(e) lors de l'étape A/, selon l'identification de défaut de l'étape c. du premier aspect.

[0053] Selon un mode de réalisation, l'ébauche de spiral est formée sur une plaquette, avec une pluralité d'autres ébauches de spiral.

[0054] Un troisième aspect de l'invention se rapporte à un procédé d'apprentissage d'une machine de prédiction pour mettre en œuvre l'étape c. du procédé de contrôle du premier aspect de l'invention, comprenant les étapes consistant à :

- i- former des spiraux ou des ébauches de spiraux,
 - 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 ou en réponse à l'application de la plage fréquentielle prédéterminée,
 - 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 libre d'oscillation, 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 libre d'oscillation,
 - v- déduire au moins une fréquence de résonance attendue de la fréquence de résonance identifiée à l'étape iii-, et/ou de la fréquence libre d'oscillation mesurée à l'étape iv'- et/ou calculée à l'étape iv"- ;
 - vi- fournir à la machine de prédiction, et pour chaque spiral ou ébauche :
- la caractéristique de la fréquence de résonance identifiée à l'étape iii- ;
 - la même caractéristique de la fréquence de résonance attendue.

[0055] Cette phase d'apprentissage permet de bâtir des données de référence étalonnées pour une comparaison ultérieure lors d'une phase de prédiction / production avec recherche de défauts. En particulier, l'apprentissage permet d'obtenir des données de test de pièces de référence ou testées/simulées en parallèle pour construire par exemple un spectre de référence.

Brève description des dessins

[0056] 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 les 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 exemptes de défauts,
- la figure 10 représente un exemple de modèle de prédiction construit à partir de données extraites de la figure 9, relatives à des pièces exemptes de défauts,
- la figure 11 représente un premier exemple de mesures effectuées pour un ensemble de pièces comprenant des pièces exemptes de défauts, et des pièces défectueuses,
- la figure 12 représente un deuxième exemple de mesures effectuées pour des pièces exemptes de défauts, et des pièces défectueuses.

Mode de réalisation de l'invention

[0057] 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.

[0058] 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.

[0059] 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.

[0060] 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.

[0061] 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).

[0062] 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.

[0063] 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'usinage/gravure à travers ces motifs sont les mêmes pour tous les résonateurs.

[0064] 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.

[0065] 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.

[0066] 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. Dans ce cas, le spiral métallique 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.

[0067] 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.

[0068] 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 contre-forme 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...

[0069] La présente invention propose de déterminer à partir d'au moins une caractéristique d'une fréquence de résonance d'un échantillon de résonateurs 100 sur la plaquette à l'étape 3E et si un défaut est présent sur une pièce. Dans l'affirmative, la présente invention propose d'identifier la pièce en cause sans démontage ni mesure dans un sous-ensemble de test, selon une méthode plus performante que les méthodes de l'art antérieur.

[0070] 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 de défauts éventuellement présents.

[0071] 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 des défauts de fabrication (collage, pontage, pollution...) à certaines fréquences (fréquence propre ou fréquences de résonance associées à un pic de résonance ou à une largeur à mi-hauteur) spécifiquement choisies.

[0072] 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 si des pièces sont défectueuses, et le cas échéant, les identifier pour les mettre au rebut par exemple.

[0073] Ainsi, il est possible d'intégrer le procédé de contrôle dans un procédé de fabrication pour séparer si nécessaire les pièces défectueuses des pièces exemptes de défauts et adéquates pour obtenir une fréquence propre d'oscillation particulière et prédéterminée, une fois les résonateurs chacun accouplés à un balancier d'un mécanisme de montre donné.

Excitation vibratoire

[0074] 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 100 kHz, de préférence de 0 à 75 kHz, de préférence de 0 à 50 kHz, de préférence de 5 kHz à 50 kHz, et de préférence de 10 à 35 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.

[0075] 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.

[0076] Par ailleurs, on peut choisir une fréquence d'échantillonnage du signal d'au moins 100 kHz si la plage fréquentielle s'étend jusqu'à 50 kHz par exemple.

[0077] 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.

[0078] 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

[0079] 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.

[0080] 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.

[0081] 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.

[0082] 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, 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

[0083] 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.

[0084] 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.

[0085] 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.

5 **[0086]** 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 :

- 10
- 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).

15 **[0087]** 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.

[0088] 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

20 de déplacement et l'excitation vibratoire.

[0089] 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

25 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.

[0090] 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 :

30

- 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,

35

- 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,

40

- 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,

45

- 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.

[0091] 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

50 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

55

à la pièce à tester pour maximiser la précision de mesure des déplacements contenus dans le plan formé par la pièce au repos.

[0092] 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

[0093] 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.

[0094] 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.

[0095] 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 30 pics d'amplitude si l'excitation vibratoire balaye une plage de fréquence comprise entre 0 Hz et 50 kHz. Chaque pic d'amplitude possède une fréquence de résonance, et les amplitudes maximales varient fortement.

[0096] 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.

[0097] 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 et exemptes de défauts. 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.

[0098] 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

[0099] Détermination de la raideur et/ou des dimensions réelles du barreau des résonateurs testés

[0100] 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.

[0101] 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.

[0102] 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.

[0103] 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,

fournissent des détails sur cette méthode.

[0104] 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.

[0105] 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.

[0106] 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.

[0107] 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/ancre. 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.

[0108] 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

[0109] Pour pouvoir effectuer la détection de défauts, 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.

[0110] 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 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

EP 4 202 576 A1

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.

[0111] Cette base de données peut servir à bâtir un modèle de prédiction, et plusieurs solutions sont offertes.

[0112] 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.

[0113] 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.

[0114] 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.

[0115] 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.

[0116] 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

[0117] 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.

[0118] 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%

[0119] 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.

[0120] 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.

[0121] 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.

[0122] 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.

[0123] 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.

[0124] 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).

[0125] 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

[0126] 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.

[0127] 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.

[0128] 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.

[0129] 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

[0130] 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.

[0131] 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.

[0132] 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.

[0133] 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.

[0134] 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.).

[0135] La demanderesse s'est aussi aperçue que la phase de prédiction peut aussi ou alternativement être une méthode pour détecter des défauts significatifs sur les pièces, tels que des spires collées ou pontées entre elles ou sur le substrat. La figure 11 montre par exemple des spectres de fréquences mesurés sur des ébauches d'une plaquette, incluant des pièces correctes (dont les pics de résonance sont entourés par des rectangles en traits mixtes et repérés « OK »), et des pièces incorrectes repérées P1, P2, P3, P4, P5 et P6.

[0136] En effet, lors du test, chaque spectre de fréquence obtenu en réponse à l'excitation vibratoire est relié à une pièce particulière par traçabilité, et une inspection de chacune des pièces ayant généré un des pics de résonance P1 à P6 s'avère présenter un défaut. En conséquence, la comparaison de chacun de ces spectres de fréquence avec le spectre de référence préalablement établi lors de la phase d'apprentissage permet de constater une déviation ou une divergence significative, ce qui révèle un défaut qui permet la mise au rebut de la pièce en cause.

[0137] Dans cet exemple, la méthode comprend une étape de recherche et d'identification de pics de résonance surnuméraires par rapport à un spectre de fréquence attendu. Un tel pic surnuméraire peut être détecté s'il dépasse un niveau attendu de bruit d'au moins 30%. En d'autres termes, la présence d'un pic de résonance présent entre deux pics de résonance normalement adjacents ou consécutifs forme une caractéristique anormale de fréquence de résonance et permet d'identifier un spiral ou une ébauche avec un défaut de spires collées. De tels défauts ne peuvent pas être

corrigés aisément, si bien que la pièce est identifiée et en principe mise au rebut.

[0138] La figure 12 montre un autre exemple ou type de caractéristique anormale par rapport à un spectre de référence. En effet, sur la fréquence de résonance attendue aux alentours de 24.1 kHz, parmi les courbes avec un seul pic de résonance (repérées « OK »), on peut noter la présence d'une courbe représentée en gras, avec un « double pic » de résonance. Dans ce cas, pour détecter un défaut, la méthode peut effectuer la recherche de deux sommets ou trois points de changement de pente dans la partie de courbe située à mi-hauteur ou au-dessus de la moitié de la valeur maximale enregistrée (au lieu d'un seul maximum ou un seul changement de pente pour une pièce exempte de défauts).

[0139] Ainsi, en recherchant des pics normalement absents du spectre de référence comme sur la figure 11, ou des pics de résonance notablement différents des pics attendus comme sur la figure 12 (avec plusieurs changements de pente ou maximums, ou encore une amplitude notablement différente), on peut identifier des pièces qui présentent un défaut de spires collées, de pontage avec le substrat, une hétérogénéité de la matière, une déformation résiduelle du spiral, des micro fissures ou encore une pollution intempestive. Chaque spectre de fréquence obtenu est assigné ou relié par traçabilité aux pièces testées, si bien qu'il est possible d'identifier les pièces en cause et les isoler ou pour les mettre au rebut.

Revendications

1. Procédé de contrôle d'un spiral ou d'une ébauche de spiral agencée pour former un spiral, le spiral devant présenter au moins une fréquence de résonance prédéterminée attendue, 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 la caractéristique de fréquence de résonance identifiée à l'étape b. pour déterminer si un défaut affecte le spiral ou l'ébauche de spiral.
2. Procédé de contrôle selon la revendication 1, dans lequel l'étape c. comprend au moins une étape de comparaison d'un spectre de fréquences vibratoires du spiral ou de l'ébauche de spiral avec un spectre de référence, de sorte à déterminer si la caractéristique identifiée à l'étape b. est une caractéristique anormale divergeant d'une différence prédéterminée avec la même caractéristique de la fréquence de résonance prédéterminée attendue.
3. Procédé de contrôle selon la revendication 1 ou 2, 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.
4. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 3,

dans lequel le défaut affectant le spiral ou l'ébauche de spiral est un défaut modifiant des modes de résonance attendus,

dans lequel l'étape c. comprend une étape consistant à rechercher un pic de résonance anormal entre deux pics de résonance attendus et normalement adjacents ou consécutifs.
5. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 4,

dans lequel le défaut affectant le spiral ou l'ébauche de spiral est un défaut atténuant ou amplifiant des modes de résonance attendus,

dans lequel l'étape c. comprend une étape consistant à rechercher un pic de résonance anormal d'une amplitude différente d'au moins 30% d'une amplitude attendue d'un pic de résonance attendu.
6. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 5, 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.
7. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 6, 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.

8. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 6 ou 7, 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.

9. Procédé de contrôle selon la revendication 8, 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.

10. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 9, dans lequel la machine de prédiction met en œuvre une classification effectuée par exemple par un réseau de neurones pour prédire si un défaut affecte le spiral ou l'ébauche de spiral.

11. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 10, 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.

12. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 11, dans lequel la plage fréquentielle s'étend sur une plage de fréquence 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.

13. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 12, dans lequel, si l'étape c. détermine qu'un défaut affecte le spiral ou l'ébauche de spiral, 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.

14. 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 de l'une des revendications précédentes.

15. Procédé de fabrication selon la revendication précédente, comprenant 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/, selon l'identification de défaut de l'étape c. de la revendication 1.

16. Procédé de fabrication selon l'une des revendications 13 à 14, dans lequel l'ébauche de spiral est formée sur une plaquette, avec une pluralité d'autres ébauches de spiral.

17. 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 13, comprenant les étapes consistant à :

- i- former des spiraux ou des ébauches de spiraux,
- 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,
- 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 libre d'oscillation, et/ou
- iv''- modéliser dans un outil de simulation une pluralité de spiraux ou d'ébauches de spiral dans un mécanisme

EP 4 202 576 A1

oscillant présentant une inertie prédéterminée de sorte à calculer pour chaque spiral ou ébauche de spiral une fréquence libre d'oscillation

v- déduire au moins une fréquence de résonance attendue de la fréquence de résonance identifiée à l'étape iii-, et/ou de la fréquence libre d'oscillation mesurée à l'étape iv'- et/ou calculée à l'étape iv"-

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

- la caractéristique de la fréquence de résonance identifiée à l'étape iii- ;
- la même caractéristique de la fréquence de résonance attendue.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

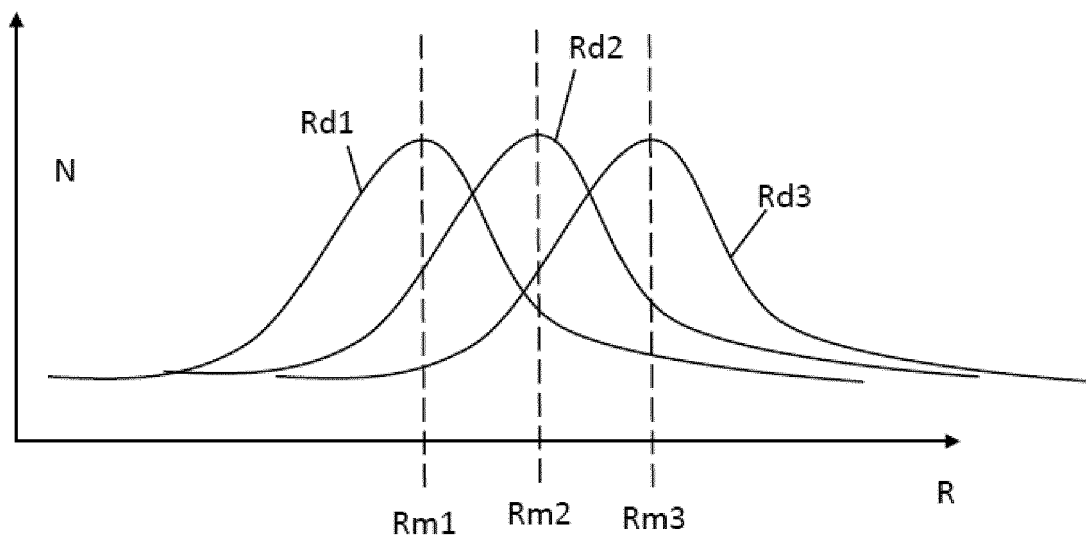


FIG. 1

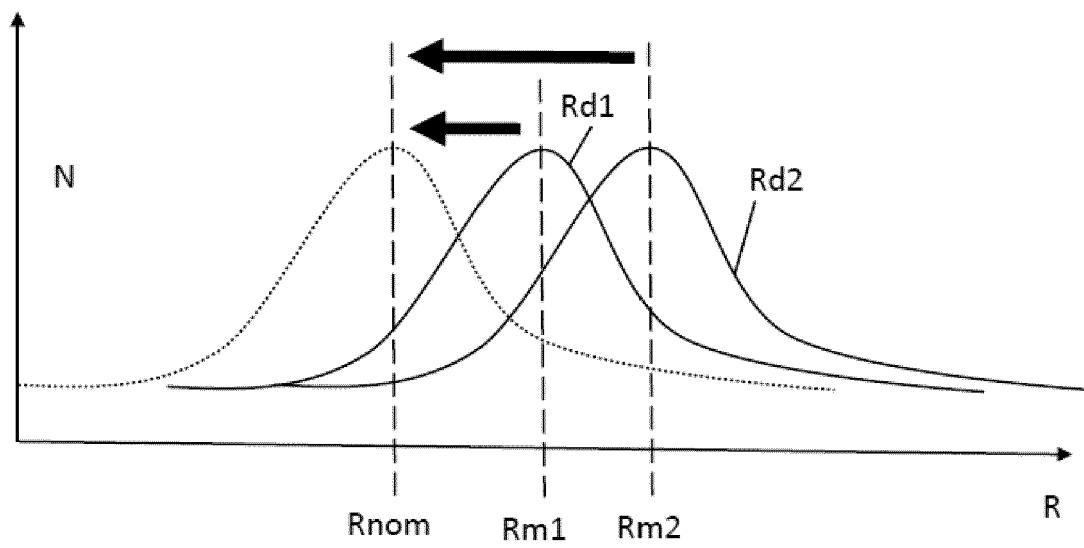


FIG. 2

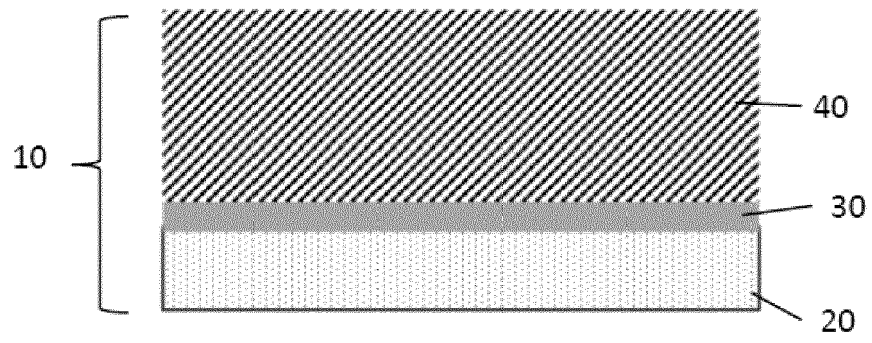


FIG. 3A

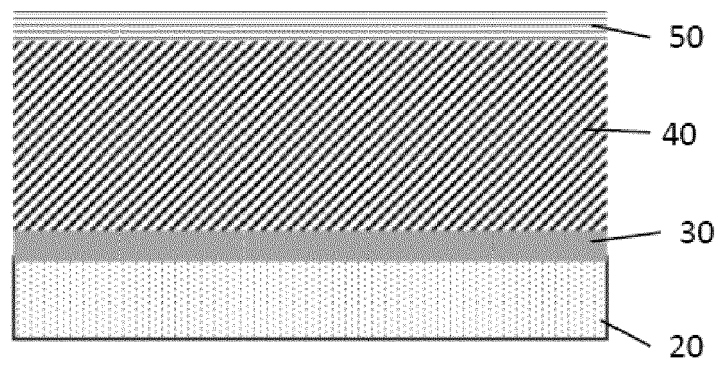


FIG. 3B

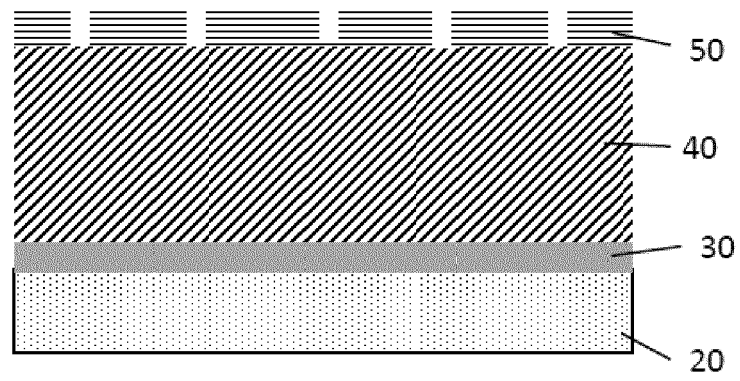


FIG. 3C

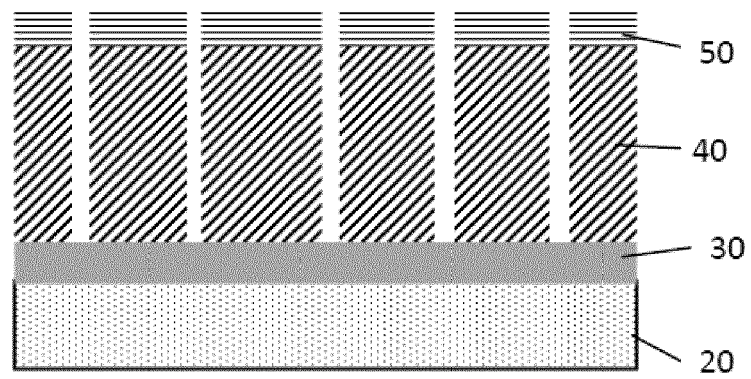


FIG. 3D

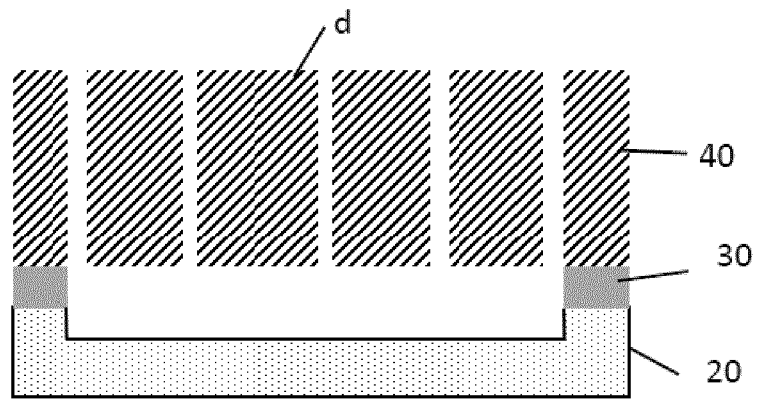


FIG. 3E

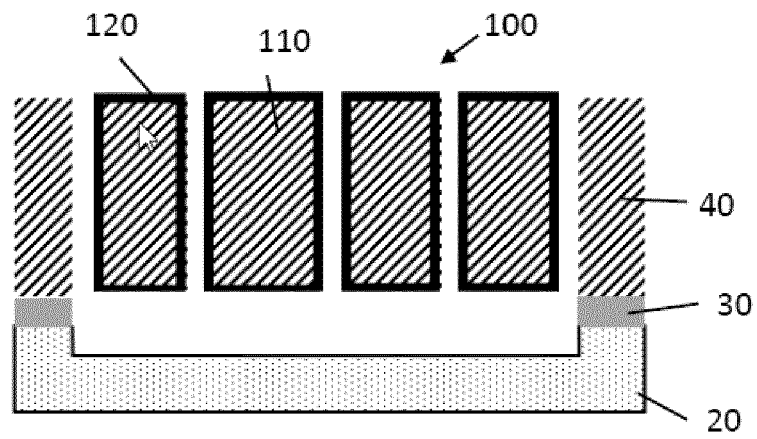


FIG. 3F

Fig. 4

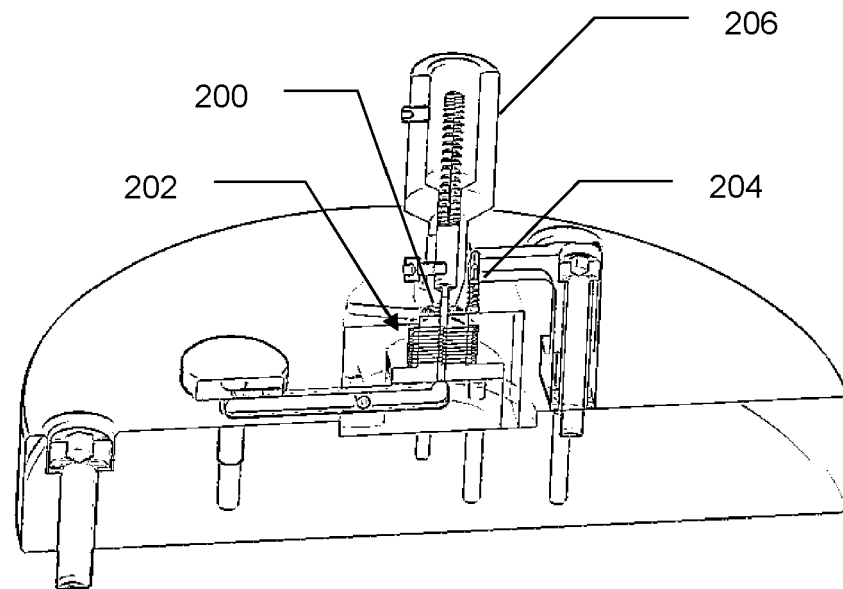


Fig. 5

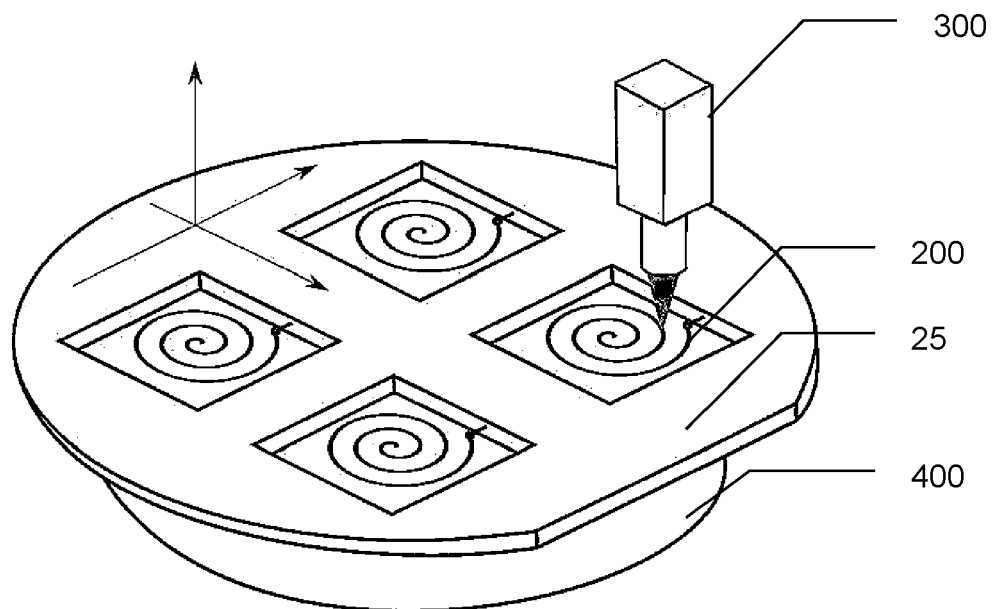


Fig. 6

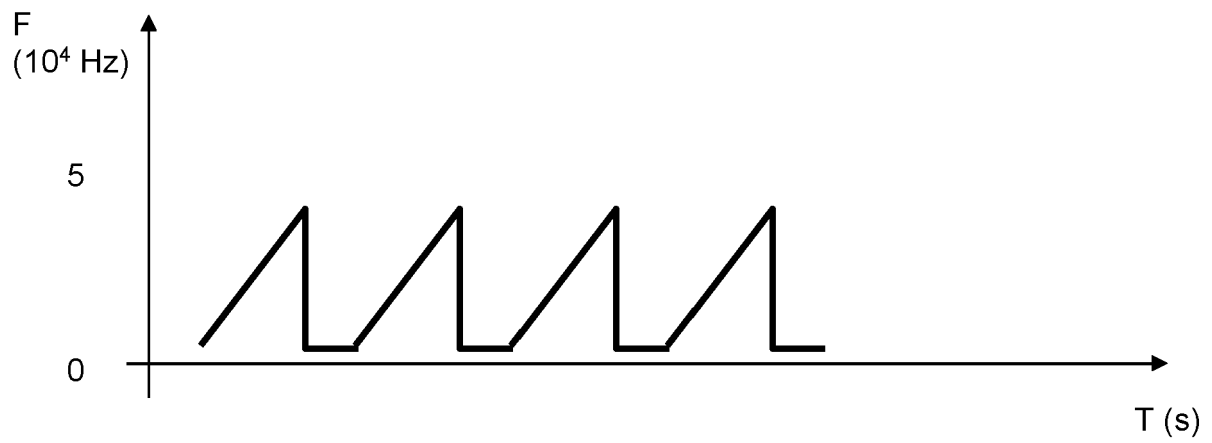


Fig. 7

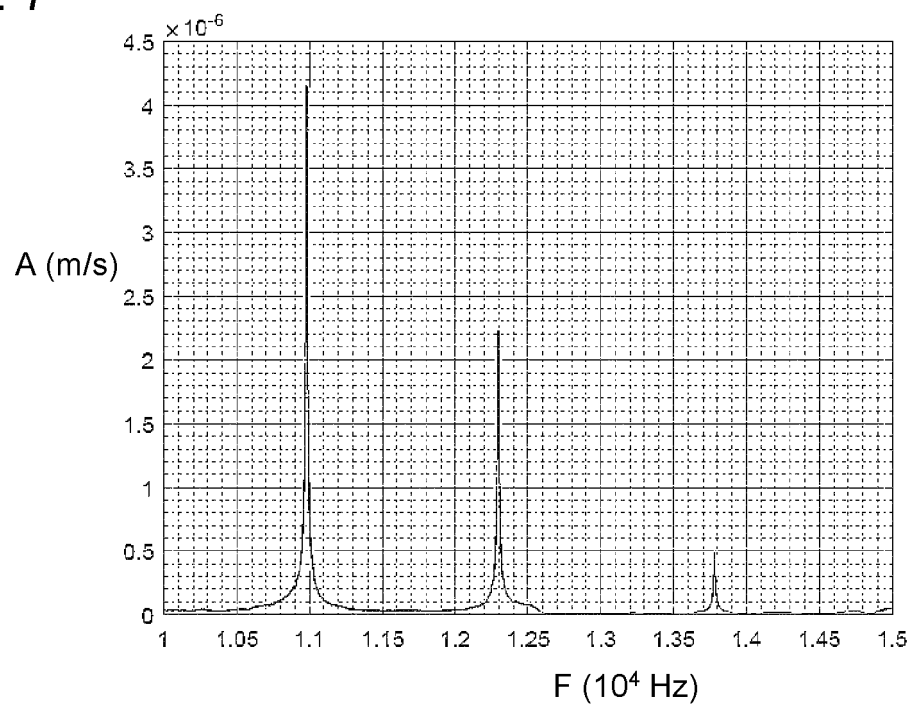


Fig. 8

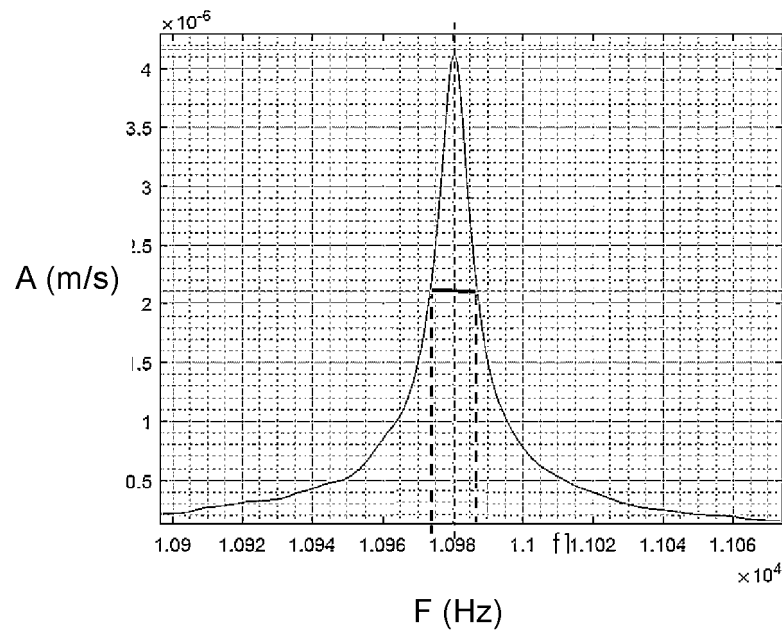


Fig. 9

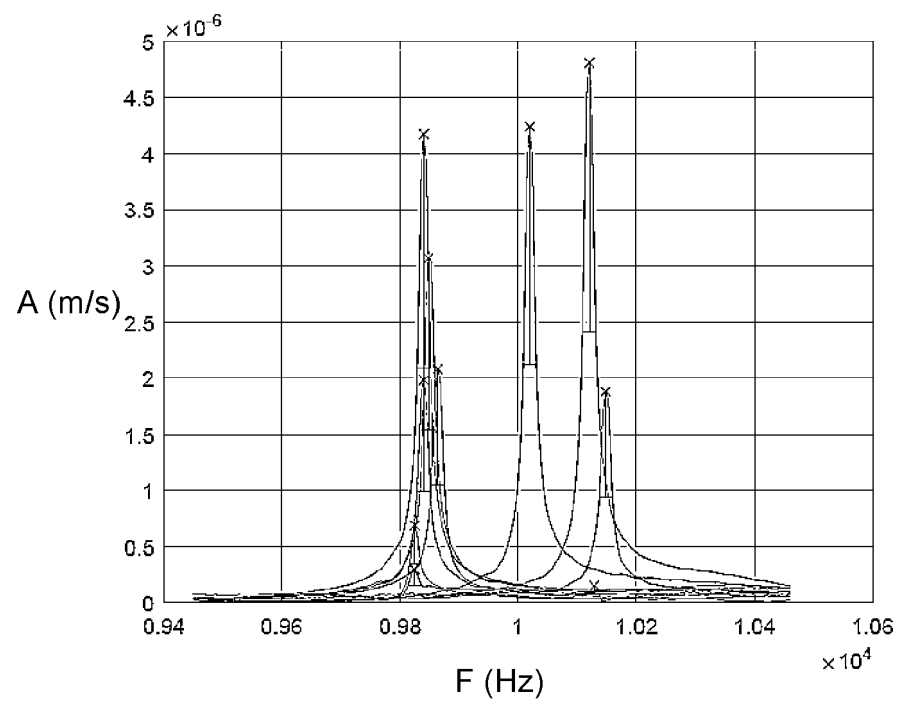


Fig. 10

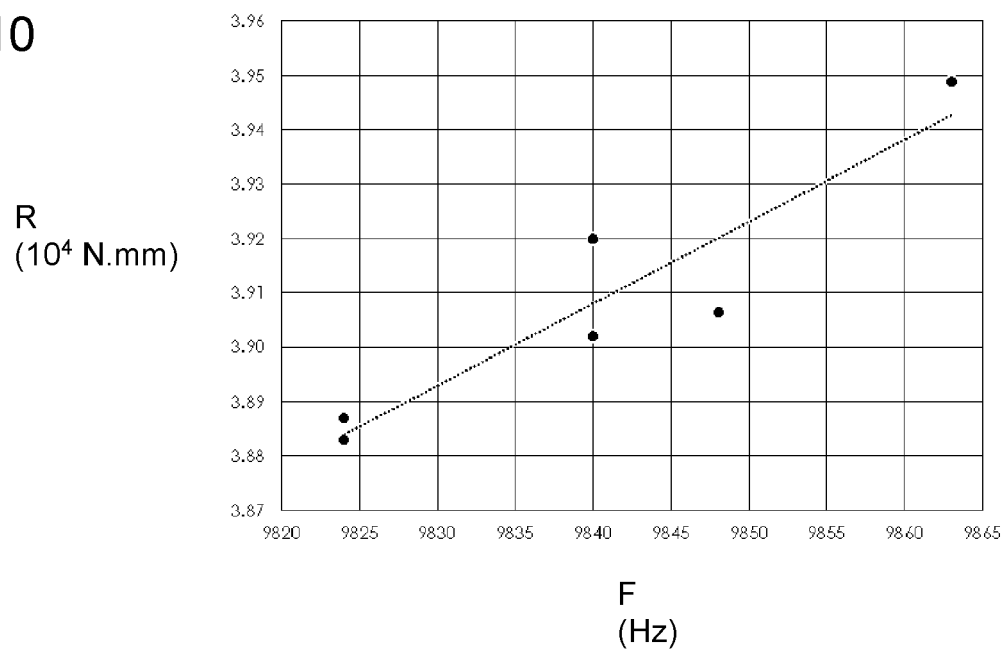


Fig. 11

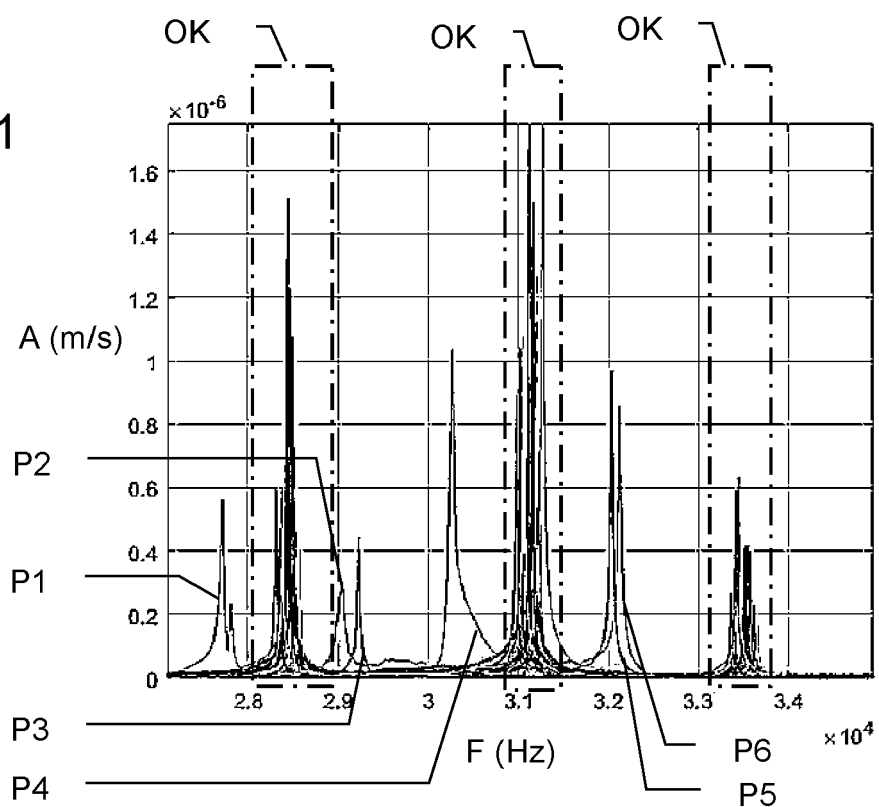
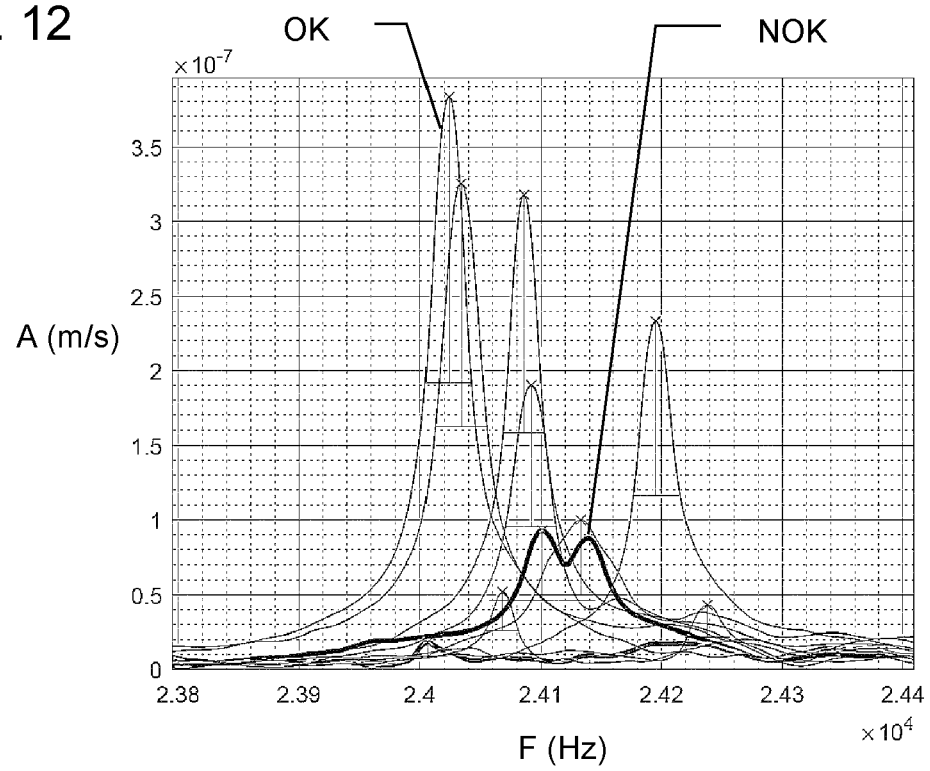


Fig. 12





RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 21 21 6760

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
X	CH 281 496 A (SMITH & SONS LTD S [GB]; FURZEHILL LAB LIMITED [GB]) 15 mars 1952 (1952-03-15)	1-3, 6, 10-16	INV. G04D7/10 G04D7/12
A	* page 1, ligne 51 - page 2, ligne 30 * * page 3, ligne 71 - ligne 87 * -----	4, 5, 7-9, 17	G04B17/06
X	DE 921 320 C (NAMENYI-KATZ LASZLO; EPSYLON RES & DEV COMPANY LTD) 16 décembre 1954 (1954-12-16)	1-3, 11, 14-16	
A	* revendication 1 * * figures * -----	4, 5, 7-9, 17	
X	FR 1 502 464 A (STRAUMANN INST AG) 18 novembre 1967 (1967-11-18)	1-3, 11, 14-16	
A	* page 1, ligne 1 - page 2, ligne 18 * -----	4, 5, 7-9, 17	
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
			G04D G04B
Lieu de la recherche La Haye			Examineur Pirozzi, Giuseppe
Date d'achèvement de la recherche 13 juin 2022			
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 21 21 6760

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.

13-06-2022

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
CH 281496 A	15-03-1952	AUCUN	
DE 921320 C	16-12-1954	AUCUN	
FR 1502464 A	18-11-1967	CH 483050 A	29-08-1969
		CH 1342866 A4	29-08-1969
		DE 1962877 U	22-06-1967
		FR 1502464 A	18-11-1967

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 [0009]
- EP 2215531 A [0009]
- WO 2016128694 A [0009]
- WO 2015113973 A [0013]
- EP 3181938 A [0013]
- EP 3181939 A [0013] [0133]
- EP 3654111 A [0067]

Littérature non-brevet citée dans la description

- **M. VERMOT et al.** dans le *Traité de construction horlogère*, 2011, 178-179 [0103]