



(11) **EP 4 030 243 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
25.09.2024 Bulletin 2024/39

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

(21) Numéro de dépôt: **21152144.8**

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):
G04D 7/10; G04D 7/125; G04D 7/1285

(22) Date de dépôt: **18.01.2021**

(54) **PROCÉDÉ DE CONTROLE ET DE FABRICATION DE RESSORTS SPIRAUX D' HORLOGERIE**
VERFAHREN ZUR KONTROLLE UND ZUR HERSTELLUNG VON UHRWERK-SPIRALFEDERN
METHOD FOR MONITORING AND MANUFACTURING TIMEPIECE HAIRSPRINGS

(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

- **SOOBBARAYEN, Kevin**
25300 Pontarlier (FR)
- **TOBENAS, Susana**
2017 Boudry (CH)

(43) Date de publication de la demande:
20.07.2022 Bulletin 2022/29

(74) Mandataire: **Poindron, Cyrille et al**
Novagraaf International SA
Chemin de l'Echo 3
1213 Onex (CH)

(73) Titulaire: **Richemont International S.A.**
1752 Villars-sur-Glâne (CH)

(56) Documents cités:
CH-A- 281 496 DE-C- 921 320
FR-A- 1 502 464

(72) Inventeurs:
• **GACHET, David**
2000 Neuchâtel (CH)

EP 4 030 243 B1

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

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 noeud de vibration. Typiquement, lors d'un tel essai, l'enregistrement de l'amplitude de déplacement en fonction de la fréquence d'excitation présente un pic d'amplitude de déplacement ou pic de résonance qui est associé ou qui caractérise la fréquence de résonance.

35 **[0005]** La raideur d'un résonateur de type spiral dépend typiquement des caractéristiques de matériau, 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 (*alpha*) 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 (SiO₂) 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] Cette approche nécessite une grande précision au niveau de la mesure de la fréquence du spiral pour déterminer sa raideur. En particulier, des erreurs de mesure peuvent être causées par le balancier d'inertie prédéterminée, ou par le montage effectué. On doit ensuite réaliser une étape de calcul de l'épaisseur à retirer pour, à nouveau, retirer avec une grande précision l'épaisseur calculée. De plus, on peut noter que l'accouplement du spiral avec le balancier doté d'une inertie prédéterminée nécessite des opérations minutieuses et requérant un temps de préparation élevé. Enfin, on peut également noter que toute opération d'assemblage sur des pièces ou ébauches encore présentes sur une plaquette augmente significativement le risque de pollution (par exemple présence des fines particules de silicium (débris) produits lors des manipulations).

[0016] Le document CH 281 496 A, qui concerne un dispositif de réglage automatique de la fréquence d'un système balancier-oscillateur, divulgue l'excitation d'un balancier-spiral afin d'en détecter l'écart par rapport à la fréquence (de référence) d'excitation.

[0017] La présente invention a pour but de proposer une approche exempte des inconvénients ci-dessus, qui permette un flux de production plus rapide et/ou avec moins de risques de pollution(s), et/ou un échantillonnage plus important, et/ou une mesure plus précise, et donc une correction plus individualisée des spiraux de la plaquette.

Divulguation de l'invention

[0018] De façon plus précise, 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, 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, telle qu'un pic de résonance, du spiral ou de l'ébauche de spiral lors de 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 une raideur du spiral ou de l'ébauche de spiral.

[0019] Le procédé selon la mise en oeuvre ci-dessus comprend une étape d'excitation vibratoire du spiral ou de l'ébauche de spiral et la mesure d'une caractéristique d'une fréquence de résonance, pour en déduire ensuite par prédiction une raideur et éventuellement si une correction dimensionnelle est nécessaire.

[0020] 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.

[0021] Le procédé selon la mise en oeuvre ci-dessus permet donc de tester des ébauches de spiraux en cours de fabrication en limitant les risques de pollution ou d'erreurs de montage. Une correction dimensionnelle (de section, de hauteur et/ou d'épaisseur) est alors possible. Le procédé selon la mise en oeuvre ci-dessus permet tout aussi bien de tester des spiraux terminés pour par exemple effectuer un classement par incréments de raideur, afin de prévoir un appairage avec un balancier particulier.

[0022] 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).

[0023] 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.

[0024] La correction dimensionnelle prédite par la machine de prédiction peut être typiquement une correction de la

section du barreau flexible formant le spiral ou l'ébauche de spiral, c'est-à-dire une correction soit de la hauteur, soit de l'épaisseur, soit les deux.

[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] 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.

[0027] 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.

[0028] Selon un mode de réalisation, le spiral présente au moins deux fréquences de résonance prédéterminées, et la plage fréquentielle est prédéterminée pour couvrir au moins les deux fréquences de résonance prédéterminées. 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.

[0029] 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.

[0030] 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.

[0031] 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.

[0032] Selon un mode de réalisation, l'étape b comprend l'utilisation d'un moyen de mesure optique, tel qu'un vibromètre laser par effet Doppler.

[0033] 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 encore 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.

[0034] 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.

[0035] 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.

[0036] Les mesures de déplacements ou de vitesses selon plusieurs directions permettent de mieux identifier les pics et fréquences de résonnance.

[0037] Selon un mode de réalisation :

- 5 - pour une première fréquence de résonnance 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
- 10 - pour une deuxième fréquence de résonnance 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.

[0038] Selon la fréquence de résonnance, 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.

[0039] Selon un mode de réalisation, l'étape b comprend une étape de traitement du signal de mesure avec par exemple une transformée de Fourier, pour identifier des pics de résonnance d'amplitude de déplacement ou de vitesse ou d'accélération, et/ou de phase, en fonction de la fréquence d'excitation.

[0040] Selon un mode de réalisation, l'étape b comprend :

- une étape d'identification d'un pic de résonnance 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.

[0041] Selon un mode de réalisation, la fréquence de résonnance est identifiée sur la base de la largeur du pic de résonnance ou d'amplitude, à mi-hauteur de la valeur maximale du pic de résonnance d'amplitude. 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.

[0042] Selon un mode de réalisation, l'étape c comprend une étape de calcul d'une raideur du spiral ou de l'ébauche de spiral. Le calcul de la raideur permet de déterminer avec une précision améliorée si une correction dimensionnelle est nécessaire, et de quelle valeur doit être cette correction. De plus, cela permet aussi de pré-dimensionner ou de choisir un balancier pour accoupler le spiral une fois qu'il sera fini de fabriquer.

[0043] Selon un mode de réalisation, si une correction dimensionnelle est nécessaire, alors le procédé comprend une étape :

35 d. calculer, avec la machine de prédiction, la modification dimensionnelle (modification de section, de hauteur et/ou d'épaisseur) à appliquer à partir de la caractéristique de fréquence de résonnance identifiée à l'étape b.

[0044] Selon un mode de réalisation, la machine de prédiction met en oeuvre une formule polynomiale pour prédire si une correction dimensionnelle est nécessaire. On peut par exemple effectuer une modélisation par régression linéaire.

[0045] Selon un mode de réalisation, la machine de prédiction met en oeuvre une classification effectuée par exemple par un réseau de neurones pour prédire si une correction dimensionnelle est nécessaire.

[0046] Selon un mode de réalisation, la machine de prédiction met en oeuvre une classification basée sur un partitionnement en k-moyennes ou en k-médianes pour prédire si une correction dimensionnelle est nécessaire.

[0047] Selon un mode de réalisation, l'ébauche de spiral étant formée sur une plaquette comprenant une pluralité d'ébauches de spiral réparties sur plusieurs secteurs de la plaquette,

45 l'étape b comprend une étape consistant à identifier au moins une caractéristique d'une fréquence de résonnance d'au moins une ébauche de spiral pour chaque secteur, et l'étape c comprend une étape consistant à déterminer une raideur de l'ébauche de spiral; on pourrait aussi déterminer pour les ébauches de spiral de chaque secteur si une correction dimensionnelle est nécessaire. La précision de la correction dimensionnelle (section, hauteur et/ou épaisseur) est améliorée en affinant l'analyse par secteurs de la plaquette.

[0048] Selon un mode de réalisation, le procédé de contrôle comprend une étape de calcul, avec la machine de prédiction, de la modification dimensionnelle à appliquer pour les ébauches de spiral de chaque secteur.

55 **[0049]** Selon un mode de réalisation, l'étape a comprend une étape consistant à modifier une direction d'excitation vibratoire au cours du temps, de préférence dans une direction pointant sur le spiral ou l'ébauche de spiral dont la caractéristique de fréquence de résonnance est identifiée à l'étape b.

[0050] Selon un mode de réalisation, le procédé de contrôle 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.

[0051] Selon un mode de réalisation, la plage fréquentielle obtenue 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 résonnance situées sur une plage de fréquences élevées. En effet, si on s'attache à la raideur, son influence sur la fréquence de résonnance 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.

[0052] Selon un mode de réalisation, l'étape a et l'étape b sont répétées au moins plusieurs fois pour un même point de mesure du spiral ou de l'ébauche de spiral.

[0053] 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.

[0054] Un deuxième aspect de l'invention est relatif à un procédé de fabrication d'un spiral présentant au moins une fréquence de résonnance prédéterminée comprenant les étapes consistant à :

- former au moins un spiral ou une ébauche de spiral ayant des dimensions comprises dans des tolérances prédéterminées nécessaires pour obtenir la fréquence de résonnance prédéterminée,
- contrôler le spiral ou l'ébauche selon le procédé de contrôle du premier aspect.

[0055] Selon un mode de réalisation, le procédé de fabrication comprend une étape consistant à :

- corriger au moins une dimension de l'ébauche de spiral formée lors de l'étape a., selon le calcul de l'étape d. de la revendication 11, afin d'obtenir un spiral présentant la fréquence de résonnance prédéterminée.

[0056] On peut corriger les dimensions (la section, la hauteur et/ou l'épaisseur) par retrait ou par ajout de matière.

[0057] Selon un mode de réalisation, le spiral ou l'ébauche de spiral est formée en silicium, ou en verre, ou en céramique, ou en métal, ou en nanotubes de carbone.

[0058] Selon un mode de réalisation, l'ébauche de spiral est formée sur une plaquette, avec une pluralité d'autres ébauches de spiral.

[0059] Un troisième aspect de l'invention se rapporte à un procédé d'apprentissage d'une machine de prédiction pour mettre en oeuvre l'étape c du procédé de contrôle du premier aspect, comprenant les étapes consistant à :

- i- former des spiraux ou des ébauches de spiraux,
- ii- appliquer à chacun des spiraux ou à 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 résonnance de chaque spiral ou chaque ébauche de spiral lors de l'excitation vibratoire sur 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 chaque ébauche de spiral une fréquence libre d'oscillation ou une raideur 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 chaque ébauche de spiral une fréquence libre d'oscillation ou une raideur

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

- la caractéristique de la fréquence de résonnance identifiée à l'étape iii- ;
- la fréquence libre d'oscillation ou la raideur mesurée(s) à l'étape iv'-et/ou calculée(s) à l'étape iv"-.

[0060] Préférentiellement, il sera choisi d'utiliser un instrument de mesure suffisamment sensible sur la plage fréquentielle choisie, et en s'assurant que le comportement vibratoire du spiral soit exploitable sur cette plage fréquentielle choisie.

[0061] Selon un mode de réalisation, l'étape iii- comprend une phase préliminaire d'identification de points de mesure de référence avec :

- la mesure d'un déplacement ou d'une vitesse de déplacement d'une pluralité de points prédéterminés du spiral ou de l'ébauche du spiral,
- l'identification de noeuds parmi la pluralité de points prédéterminés, qui présentent à au moins une fréquence ou pic de résonnance une amplitude de déplacement nulle ou inférieure à une première valeur de pic seuil,
- la sélection de points de référence à mesurer lors du contrôle parmi la pluralité de points prédéterminés, qui sont différents des noeuds identifiés, et qui de préférence présentent chacun un pic d'amplitude de déplacement supérieur à une deuxième valeur de pic seuil.

[0062] Une telle étape d'identification des points de référence permet d'éliminer les points ou les zones qui sont des noeuds (c'est-à-dire des points immobiles) à une ou plusieurs fréquences de résonnance.

[0063] Selon un mode de réalisation, le spiral ou l'ébauche de spiral présente un rayon R_a défini entre une extrémité centrale libre et une extrémité périphérique encastrée, et au moins deux points de référence, et de préférence quatre points de référence sont choisis et localisés :

- dans une première zone à moins de $0.20 \times R_a$, ou
- dans une deuxième zone entre $0.05 \times R_a$ et $0.30 \times R_a$, ou
- dans une troisième zone entre $0.35 \times R_a$ et $0.65 \times R_a$, ou
- dans une quatrième zone entre $0.65 \times R_a$ et $0.85 \times R_a$.

[0064] Le choix de ces zones garantit que les points dont les déplacements sont suivis présentent une amplitude de déplacement suffisante pour être mesurée correctement et avec une bonne précision.

Brève description des dessins

[0065] D'autres détails de l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description qui suit, faite en référence au dessin annexé dans lequel :

- 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 oeuvre 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 résonnance identifié à une fréquence particulière sur la figure 7,
- la figure 9 représente les pics de résonnance mesurés et superposés pour la fréquence particulière de la figure 8,
- la figure 10 représente un exemple modèle de prédiction construit à partir de données extraites de la figure 9.

Mode de réalisation de l'invention

[0066] 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.

[0067] 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 $500 \mu\text{m}$, la couche sacrificielle 30 peut avoir une épaisseur de $2 \mu\text{m}$ et la couche en silicium 40 peut avoir une épaisseur de $120 \mu\text{m}$. La couche de silicium monocristallin 40 peut avoir une orientation cristalline quelconque.

[0068] 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.

[0069] 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.

[0070] 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).

[0071] 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.

[0072] 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.

[0073] 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.

[0074] 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.

[0075] Pour centrer la moyenne de raideurs des résonateurs sur différentes plaquettes par rapport à une valeur de raideur nominale comme illustré à la figure 2, les résonateurs obtenus à l'étape 3E sur la plaquette 10 en question peuvent être délibérément formés avec des dimensions d qui sont différentes aux dimensions nécessaires (par exemple supérieures) pour l'obtention d'une raideur nominale ou cible. Ainsi, il est possible de mettre en place un procédé de contrôle destiné à estimer les caractéristiques vibratoires des résonateurs (fréquence propre et/ou fréquences de résonance) pour en déduire la raideur et/ou les dimensions réelles des résonateurs 100 pour en corriger les dimensions, ce qui conduira à obtenir la fréquence propre du couple résonateur - balancier désirée.

[0076] Dans un mode d'exécution, 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 une correction géométrique des résonateurs est nécessaire. Dans l'affirmative, la présente invention propose de calculer précisément l'épaisseur de matériau à modifier (à retirer ou à ajouter), autour de chaque spire, pour obtenir les dimensions conduisant à obtenir les caractéristiques vibratoires des résonateurs (fréquence propre et/ou fréquences de résonance, et/ou raideur) correspondant à des valeurs cibles, selon une méthode plus performante que les méthodes de l'art antérieur.

[0077] Ainsi, on pourrait 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 la correction géométrique nécessaire.

[0078] 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 les dimensions (notamment l'épaisseur) et/ou la raideur à certaines fréquences (fréquence propre ou fréquences de résonance associées à un pic de résonance ou à une largeur à mi-hauteur) spécifiquement choisies.

[0079] 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 une correction des dimensions est nécessaire, et le cas échéant, calculer ou prédire la correction exacte à apporter aux dimensions des résonateurs (par retrait si l'ébauche est réalisée avec des dimensions supérieures aux dimensions finales requises, ou par ajout de matière si l'ébauche est réalisée avec des dimensions inférieures aux dimensions finales requises, par exemple).

[0080] Ainsi, il est possible d'intégrer le procédé de contrôle dans un procédé de fabrication pour corriger si nécessaire les caractéristiques vibratoires des résonateurs (fréquence propre et/ou fréquences de résonance, et/ou raideur) 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

[0081] 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.

[0082] 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.

[0083] 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.

[0084] 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.

[0085] 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

[0086] 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.

[0087] 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.

[0088] 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.

[0089] 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

[0090] 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 noeuds, 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 noeud à une ou plusieurs fréquence(s) particulière(s), l'identification de caractéristiques de fréquences de résonance sera affectée négativement.

[0091] 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.

[0092] 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 noeuds à ces fréquences de résonance. Autrement dit, les noeuds 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 noeuds 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.

[0093] Typiquement, on peut considérer qu'au moins deux points de référence seront sélectionnés, et de préférence au moins quatre points de référence seront sélectionnés. Dans le cas où le résonateur présente un rayon R_a et se trouve ancré ou encastré sur la plaquette par son extrémité extérieure de pitonnage, on peut sélectionner de préférence quatre points de référence choisis et localisés :

- dans une première zone à moins de $0.20 \times R_a$ (par exemple sur la virole centrale), ou
- dans une deuxième zone entre $0.05 \times R_a$ et $0.30 \times R_a$ (par exemple sur la deuxième spire en partant de la virole), ou
- dans une troisième zone entre $0.35 \times R_a$ et $0.65 \times R_a$ (par exemple sur une spire située au milieu du spiral), ou
- dans une quatrième zone entre $0.65 \times R_a$ et $0.85 \times R_a$ (par exemple sur une spire située aux trois quarts du spiral).

[0094] 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.

[0095] Par ailleurs, on peut aussi mesurer les déplacements d'un point du corps de la plaquette, et/ou d'un point de la source d'excitation, pour identifier ou mesurer par exemple un décalage de phase ou une atténuation vibratoire, ou encore une résonance issue d'un couplage vibratoire ou bien de la plaquette. Ces mesures complémentaires permettent de s'assurer que les pics identifiés sont bien ceux du spiral seul. On peut également synchroniser la mesure d'amplitude de déplacement et l'excitation vibratoire.

Détermination des caractéristiques vibratoires

[0096] 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 résonnance dans le signal enregistré.

[0097] En conséquence, on peut identifier au moins un pic de résonnance pour chaque résonateur excité, et il est proposé de déterminer la fréquence de résonnance non pas sur la base du sommet du pic de résonnance, 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 résonnance, 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 résonnance 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 résonnance. La zone de la courbe située entre 25% et 75% de la valeur d'amplitude maximale du pic de résonnance présente une meilleure précision que la partie supérieure à 75% (typiquement le pic), ce qui offre une meilleure précision sur la fréquence exacte de résonnance déterminée. On peut prendre par exemple le milieu du segment reliant les deux points à mi-hauteur du pic de résonnance pour déterminer la fréquence de résonnance associée au pic en question.

[0098] La figure 7 représente un exemple de spectre vibratoire pour un point d'une ébauche de spiral 200 de la figure 5, 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 résonnance, et les amplitudes maximales varient fortement.

[0099] La figure 8 représente en détail le traitement que l'on peut faire sur un pic d'amplitude, celui à 11 kHz par exemple. Le but est de trouver la fréquence de résonnance 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 résonnance étant typiquement la valeur au milieu de ce segment. Cependant, on peut effectuer une interpolation sur des points au voisinage du pic de résonnance 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 résonnance est décalée par exemple en raison de la fréquence d'échantillonnage choisie.

[0100] La figure 9 représente, pour l'exemple d'un pic d'amplitude à 10 kHz environ, les pics d'amplitudes construits pour une dizaine d'ébauches de spiral 200 testées. On peut noter que d'une ébauche de spiral à l'autre, la position en

EP 4 030 243 B1

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 apparaît judicieux de déterminer la fréquence de résonance sur la base de la largeur du pic à mi-hauteur.

[0101] 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

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

[0102] 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.

[0103] Deux alternatives peuvent être mises en oeuvre. 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.

[0104] 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.

[0105] 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.

[0106] 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.

[0107] 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.

[0108] 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.

[0109] 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/ancrer. 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.

[0110] 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

[0111] 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.

[0112] 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 des raideurs. Cette base de données peut également être complétée par des mesures expérimentales en mesurant des spectres de vibrations, périodes d'oscillation et les positions de spiraux sur la plaquette ainsi que leurs raideurs associées. L'un des avantages de cette approche réside dans le fait que la base de données d'apprentissage s'enrichit au fur et à mesure des essais. Ceci peut permettre d'avoir un modèle adaptatif selon les plaquettes et les spiraux et contribue à la réduction de l'écart-type en raideur sur les plaquettes.

[0113] Cette base de données peut servir à bâtir un modèle de prédiction, et plusieurs solutions sont offertes.

[0114] 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.

[0115] 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.

[0116] 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.

EP 4 030 243 B1

[0117] 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.

[0118] 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

[0119] 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.

[0120] 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%
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%

[0121] 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.

[0122] 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 $0.0015 \cdot 10^{-7} \text{ N.mm/Hz}$. 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.

[0123] 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.

[0124] 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.

[0125] 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.

[0126] 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).

[0127] 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

[0128] 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.

[0129] Une fois le modèle entraîné, la procédure de contrôle à déployer est 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.

[0130] 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.

[0131] Répéter 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

[0132] 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.

[0133] 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.

[0134] 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.

[0135] 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.

[0136] 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.).

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, 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, telle qu'un pic de résonance, du spiral ou de l'ébauche de spiral lors de 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 une raideur du spiral ou de l'ébauche de spiral.

2. Procédé de contrôle selon la revendication 1, dans lequel l'étape c comprend en outre une étape consistant à prédire si une correction dimensionnelle du spiral ou de l'ébauche de spiral est nécessaire pour obtenir la fréquence de résonance prédéterminée

3. Procédé de contrôle selon la revendication 1 ou 2, dans lequel la plage fréquentielle est prédéterminé 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.

4. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 3, le spiral présentant au moins deux fréquences de résonance prédéterminées, dans lequel la plage fréquentielle est prédéterminée pour couvrir au moins les deux fréquences de résonance prédéterminées.

5. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 4, 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.

6. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 5, 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.

7. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 5 à 6, dans lequel l'étape b comprend :

- une étape d'identification d'un pic de résonnance 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.

8. Procédé de contrôle selon la revendication 7, dans lequel la fréquence de résonnance est identifiée sur la base de la largeur du pic de résonnance, à mi-hauteur de la valeur maximale du pic de résonnance.

9. Procédé de contrôle selon la revendication 2 ou selon l'une des revendications 3 à 8 dans leur dépendance à la revendication 2, dans lequel, si une correction dimensionnelle est nécessaire, alors le procédé comprend une étape : d. calculer, avec la machine de prédiction, la modification dimensionnelle à appliquer à partir de la caractéristique de résonnance identifiée à l'étape b.

10. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 9, dans lequel la machine de prédiction met en oeuvre une formule polynomiale pour prédire une raideur réelle.

11. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 9, dans lequel la machine de prédiction met en oeuvre une classification effectuée par exemple par un réseau de neurones pour prédire une raideur réelle.

12. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 11, l'ébauche de spiral étant formée sur une plaquette comprenant une pluralité d'ébauches de spiral réparties sur plusieurs secteurs de la plaquette,

- dans lequel l'étape b comprend une étape consistant à identifier au moins une caractéristique d'une fréquence de résonnance d'au moins une ébauche de spiral pour chaque secteur,
- et dans lequel l'étape c comprend une étape consistant à déterminer pour les ébauches de spiral de chaque secteur une raideur.

13. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 12, comprenant une étape préliminaire consistant à prendre en compte la matière du spiral ou de l'ébauche de spiral, et à ajuster une amplitude maximale de l'excitation vibratoire et/ou une plage de fréquence de la plage fréquentielle prédéterminée en fonction de la matière du spiral ou de l'ébauche de spiral.

14. Procédé de contrôle selon l'une des revendications 1 à 13, dans lequel 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.

15. Procédé de fabrication d'un spiral présentant au moins une fréquence de résonnance prédéterminée comprenant les étapes consistant à :

- former au moins un spiral ou une ébauche de spiral ayant des dimensions comprises dans des tolérances prédéterminées nécessaires pour obtenir la fréquence de résonnance prédéterminée,
- contrôler le spiral ou l'ébauche de spiral selon le procédé de contrôle de l'une des revendications précédentes.

16. Procédé de fabrication selon la revendication précédente, comprenant une étape consistant à :

- corriger au moins une dimension de l'ébauche de spiral formée lors de l'étape a., selon le calcul de l'étape d. de la revendication 9, afin d'obtenir un spiral présentant la fréquence de résonnance prédéterminée.

17. Procédé de fabrication selon l'une des revendications 15 à 16, dans lequel l'ébauche de spiral est formée sur une plaquette, avec une pluralité d'autres ébauches de spiral.

18. Procédé d'apprentissage d'une machine de prédiction pour mettre en oeuvre l'étape c du procédé de contrôle de l'une des revendications 1 à 14, 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 ou une raideur, 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 ou une raideur

v- 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 fréquence libre d'oscillation ou la raideur mesurée(s) à l'étape iv'- et/ou calculée(s) à l'étape iv"-.

19. Procédé d'apprentissage selon la revendication précédente, dans lequel l'étape iii- comprend une phase préliminaire d'indentification de points de mesure de référence avec :

- la mesure d'un déplacement d'une pluralité de points prédéterminés du spiral ou de l'ébauche du spiral,
- l'identification de noeuds parmi la pluralité de points prédéterminés, qui présentent à au moins une fréquence ou pic de résonance une amplitude de déplacement nulle ou inférieure à une première valeur de pic seuil,
- la sélection de points de référence à mesurer lors du contrôle parmi la pluralité de points prédéterminés, qui sont différents des noeuds identifiés, et qui de préférence présentent chacun pic d'amplitude de déplacement supérieur à une deuxième valeur de pic seuil.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Kontrolle einer Spiralfeder oder eines Spiralfederrohrlings, der eingerichtet ist, um eine Spiralfeder zu bilden, wobei die Spiralfeder mindestens eine vorbestimmte Resonanzfrequenz aufweisen muss, wobei das Kontrollverfahren die folgenden Schritte aufweist:

- a. Anwenden einer zeitlich variablen Schwingungsanregung auf die Spiralfeder oder den Spiralfederrohrling, um einen vorbestimmten Frequenzbereich abzudecken,
- b. Identifizieren mindestens eines Merkmals einer Resonanzfrequenz, wie z. B. eines Resonanzpeaks, der Spiralfeder oder des Spiralfederrohrlings bei der Schwingungsanregung auf den vorbestimmten Frequenzbereich,
- c. Unterziehen einer Vorhersagemaschine dem in Schritt b. identifizierten Resonanzfrequenzmerkmal, um eine Steifigkeit der Spiralfeder oder des Spiralfederrohrlings zu bestimmen.

2. Kontrollverfahren nach Anspruch 1, wobei Schritt c. ferner einen Schritt umfasst, der darin besteht vorherzusagen, ob eine Korrektur der Abmessung der Spiralfeder oder des Spiralfederrohrlings notwendig ist, um die vorbestimmte Resonanzfrequenz zu erhalten.

3. Kontrollverfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei der Frequenzbereich vorbestimmt ist, um mindestens einen Frequenzbereich einzubeziehen:

- der auf die vorbestimmte Resonanzfrequenz zentriert ist, und
- in einem Umfang von mindestens 30 % der vorbestimmten Resonanzfrequenz.

4. Kontrollverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die Spiralfeder mindestens zwei vorbestimmte Reso-

nanzfrequenzen aufweist, wobei der Frequenzbereich vorbestimmt ist, um mindestens die beiden vorbestimmten Resonanzfrequenzen abzudecken.

5 5. Kontrollverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei Schritt b. auf einer zeitlichen Messung einer Amplitude oder einer Geschwindigkeit oder einer Beschleunigung der Verlagerung mindestens eines Punktes der Spiralfeder oder des Spiralfederrohlings basiert, die vorzugsweise zumindest teilweise während Schritt a. durchgeführt wird.

10 6. Kontrollverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Spiralfeder oder der Spiralfederrohling in einer Basisebene enthalten ist, wobei Schritt b. umfasst:

- einen Messschritt b' einer Amplitude oder einer Geschwindigkeit oder einer Beschleunigung der Verlagerung mindestens eines Punktes der Spiralfeder oder des Spiralfederrohlings in einer Richtung senkrecht zur Basisebene, und/oder

15 - einen Messschritt b" einer Amplitude oder einer Geschwindigkeit oder einer Beschleunigung der Verlagerung mindestens eines Punktes der Spiralfeder oder des Spiralfederrohlings in einer in der Grundebene enthaltenen Richtung.

7. Kontrollverfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 6, wobei Schritt b. umfasst:

20 - einen Schritt des Identifizierens eines Resonanzpeaks der Spiralfeder oder des Spiralfederrohlings in Abhängigkeit von einer Amplitude oder einer Verlagerungsgeschwindigkeit mindestens eines Punktes der Spiralfeder oder des Spiralfederrohlings.

25 8. Kontrollverfahren nach Anspruch 7, wobei die Resonanzfrequenz auf der Basis der Breite des Resonanzpeaks auf halber Höhe des Maximalwerts des Resonanzpeaks identifiziert wird.

9. Kontrollverfahren nach Anspruch 2 oder nach einem der Ansprüche 3 bis 8 in ihrer Abhängigkeit von Anspruch 2, wobei, wenn eine Korrektur der Abmessung notwendig ist, dann das Verfahren einen Schritt umfasst:

30 d. Berechnen der anzuwendenden Änderung der Abmessung mit der Vorhersagemaschine ausgehend von der in Schritt b. identifizierten Resonanzcharakteristik.

10. Kontrollverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die Vorhersagemaschine eine polynomiale Formel verwendet, um eine reale Steifigkeit vorherzusagen.

35 11. Kontrollverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die Vorhersagemaschine eine Klassifizierung verwendet, die z. B. von einem neuronalen Netz durchgeführt wird, um eine reale Steifigkeit vorherzusagen.

40 12. Kontrollverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei der Spiralfederrohling auf einem Wafer gebildet wird, der eine Vielzahl von Spiralfederrohlingen umfasst, die über mehrere Sektoren des Wafers verteilt sind,

wobei Schritt b. einen Schritt umfasst, der darin besteht, mindestens ein Merkmal einer Resonanzfrequenz von mindestens einem Spiralfederrohling für jeden Sektor zu identifizieren, und wobei Schritt c. einen Schritt umfasst, der darin besteht, für die Spiralfederrohlinge jedes Sektors eine Steifigkeit zu bestimmen.

45 13. Kontrollverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, umfassend einen vorbereitenden Schritt, der darin besteht, das Material der Spiralfeder oder des Spiralfederrohlings zu berücksichtigen und eine maximale Amplitude der Schwingungsanregung und/oder einen Frequenzbereich des vorbestimmten Frequenzbereichs in Abhängigkeit von dem Material der Spiralfeder oder des Spiralfederrohlings einzustellen.

50 14. Kontrollverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, wobei sich der Frequenzbereich über einen Frequenzbereich von 0 Hz bis 100 kHz, vorzugsweise von 0 Hz bis 50 kHz, besonders bevorzugt von 0 Hz bis 40 kHz und ganz besonders bevorzugt von 10 kHz bis 35 kHz erstreckt.

55 15. Verfahren zur Herstellung einer Spiralfeder, die mindestens eine vorbestimmte Resonanzfrequenz aufweist, umfassend die Schritte, die darin bestehen:

- Bilden mindestens einer Spiralfeder oder eines Spiralfederrohlings mit Abmessungen innerhalb vorbestimmter

Toleranzen, die zum Erreichen der vorbestimmten Resonanzfrequenz notwendig sind,

- Kontrollieren der Spiralfeder oder des Spiralfederrohlings gemäß dem Kontrollverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche.

5 16. Herstellungsverfahren nach vorhergehendem Anspruch, umfassend einen Schritt, der darin besteht:

- Korrigieren mindestens einer Abmessung des in Schritt a. gebildeten Spiralfederrohlings gemäß der Berechnung in Schritt d. von Anspruch 9, um eine Spiralfeder mit der vorbestimmten Resonanzfrequenz zu erhalten.

10 17. Herstellungsverfahren nach einem der Ansprüche 15 bis 16, wobei der Spiralfederrohling auf einem Wafer zusammen mit einer Vielzahl anderer Spiralfederrohlinge gebildet wird.

18. Verfahren zum Trainieren einer Vorhersagemaschine zur Durchführung von Schritt c. des Kontrollverfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 14, umfassend die Schritte, die darin bestehen:

15 i- Bilden von Spiralfedern oder Spiralfederrohlingen,
ii- Anwenden einer zeitlich variablen Schwingungsanregung auf jede der Spiralfedern oder jeden der Spiralfederrohlinge, um einen vorbestimmten Frequenzbereich abzudecken,
iii- Identifizieren mindestens eines Merkmals einer Resonanzfrequenz jeder Spiralfeder oder jedes Spiralfederrohlings bei der Anwendung des vorbestimmten Frequenzbereichs,

iv'- Anbringen einer Vielzahl von Spiralfedern oder von Spiralfederrohlingen in einem Schwingmechanismus, der eine vorbestimmte Trägheit aufweist, so dass für jede Spiralfeder oder jeden Spiralfederrohling eine freie Schwingungsfrequenz oder eine Steifigkeit gemessen wird,
25 und/oder
iv"- Modellieren in einem Simulationswerkzeug einer Vielzahl von Spiralfedern oder von Spiralfederrohlingen in einem Schwingmechanismus, der eine vorbestimmte Trägheit aufweist, so dass für jede Spiralfeder oder jeden Spiralfederrohling eine freie Schwingungsfrequenz oder eine Steifigkeit berechnet wird.

30 v- Bereitstellen, für die Vorhersagemaschine und für jede Spiralfeder oder jeden Rohling:

- der in Schritt iii- identifizierten Resonanzfrequenzcharakteristik;
- der in Schritt iv'- gemessenen und/oder in Schritt iv"- berechneten freien Schwingungsfrequenz oder Steifigkeit.

35 19. Trainingsverfahren nach vorhergehendem Anspruch, wobei Schritt iii- eine Vorphase der Identifizierung von Referenzmesspunkten umfasst mit:

40 - dem Messen einer Verlagerung einer Vielzahl vorbestimmter Punkte der Spiralfeder oder des Spiralfederrohlings,
- dem Identifizieren von Knoten aus der Vielzahl vorbestimmter Punkte, die bei mindestens einer Resonanzfrequenz oder -peak eine Verlagerungsamplitude von null oder unter einem ersten Schwellenpeakwert aufweisen,
- dem Auswählen von bei der Kontrolle zu messenden Referenzpunkten aus der Vielzahl vorbestimmter Punkte,
45 die von den identifizierten Knoten verschieden sind und die vorzugsweise jeweils einen Verlagerungsamplitudenpeak aufweisen, der höher als ein zweiter Schwellenpeakwert ist.

Claims

50 1. A method for inspecting a spiral or a spiral blank arranged to form a spiral, the spiral having to exhibit at least one predetermined resonant frequency, the inspecting method including the following steps:

55 a. applying to the spiral or to the spiral blank a time-varying vibrational excitation to cover a predetermined frequency range,
b. identifying at least one characteristic of a resonant frequency, such as a resonance peak, of the spiral or of the spiral blank during the vibrational excitation over the predetermined frequency range,
c. submitting to a predicting machine the resonant frequency characteristic identified in the step b. to determine

a stiffness of the spiral or of the spiral blank.

2. The inspecting method as claimed in claim 1, wherein the step c further comprises a step consisting in predicting whether or not a dimensional correction of the spiral or of the spiral blank is necessary to obtain the predetermined resonant frequency.

3. The inspecting method as claimed in claim 1 or 2, wherein the frequency range is predetermined to encompass at least one frequency range:

- centered on the predetermined resonant frequency, and
- of an extent of at least 30% of the predetermined resonant frequency.

4. The inspecting method as claimed in one of claims 1 to 3, the spiral having at least two predetermined resonant frequencies, wherein the frequency range is predetermined to cover at least the two predetermined resonant frequencies.

5. The inspecting method as claimed in one of claims 1 to 4, wherein the step b is based on a measurement over time of an amplitude or of a speed or of an acceleration of displacement of at least one point of the spiral or of the spiral blank, preferably carried out at least partially during the step a.

6. The inspecting method as claimed in one of claims 1 to 5, the spiral or the spiral blank being contained in a base plane, wherein the step b comprises:

- a step b' of measuring an amplitude or a speed or an acceleration of displacement of at least one point of the spiral or of the spiral blank along a direction normal to the base plane, and/or
- a step b" of measuring an amplitude or a speed or an acceleration of displacement of at least one point of the spiral or of the spiral blank along a direction contained in the base plane.

7. The inspecting method as claimed in one of claims 5 to 6, wherein the step b comprises:

- a step of identifying a resonance peak of the spiral or of the spiral blank as a function of an amplitude or of a speed of displacement of at least one point of the spiral or of the spiral blank.

8. The inspecting method as claimed in claim 7, wherein the resonant frequency is identified on the basis of the width of the resonance peak, at mid-height of the maximum value of the resonance peak.

9. The inspecting method as claimed in claim 2 or in one of claims 3 to 8 in their dependence in claim 2, wherein, if a dimensional correction is necessary, then the method comprises a step of:

d. computing, with the predicting machine, the dimensional modification to be applied based on the resonant frequency characteristic identified in the step b.

10. The inspecting method as claimed in one of claims 1, to 9, wherein the predicting machine implements a polynomial formula to predict an actual stiffness.

11. The inspecting method as claimed in one of claims 1 to 9, wherein the predicting machine implements a classification carried out for example by a neural network to predict an actual stiffness.

12. The inspecting method as claimed in one of claims 1 to 11, the spiral blank being formed on a wafer comprising a plurality of spiral blanks distributed over several sectors of the wafer,

wherein the step b comprises a step consisting in identifying at least one characteristic of a resonant frequency of at least one spiral blank for each sector,
and wherein the step c comprises a step consisting in determining for the spiral blanks of each sector a stiffness.

13. The inspecting method as claimed in one of claims 1 to 12, comprising a preliminary step consisting in taking into account the material of the spiral or of the spiral blank, and in adjusting a maximum amplitude of the vibrational excitation and/or a range of frequency of the predetermined frequency range as a function of the material of the spiral or of the spiral blank.

14. The inspecting method as claimed in one of claims 1 to 13, wherein the frequency range extends over a range of frequencies ranging from 0 Hz to 100 kHz, preferably of 0 Hz to 50 kHz, more preferably of 0 Hz to 40 kHz, and most preferably of 10 kHz to 35 kHz.

15. A method for fabricating a spiral having at least one predetermined resonant frequency comprising the steps consisting in:

- forming at least one spiral or one spiral blank having dimensions contained within predetermined tolerances necessary to obtain the predetermined resonant frequency,
- inspecting the spiral or the spiral blank according to the inspecting method of one of the preceding claims.

16. The fabricating method as claimed in the preceding claim, comprising a step consisting in:

- correcting at least one dimension of the spiral blank formed during the step a., according to the computation of step d. of claim 9, in order to obtain a spiral having the predetermined resonant frequency.

17. The fabricating method as claimed in one of claims 15 to 16, wherein the spiral blank is formed on a wafer, with a plurality of other spiral blanks.

18. A method for training a predicting machine for implementing the step c of the inspecting method of one of claims 1 to 14, comprising the steps consisting in:

- i- forming spirals or spiral blanks,
- ii- applying to each of the spirals or to each of the spiral blanks a time-varying vibrational excitation to cover a predetermined frequency range,
- iii- identifying at least one characteristic of a resonant frequency of each spiral or of each spiral blank during the application of the predetermined frequency range,
- iv'- setting up a plurality of spirals or of spiral blanks in an oscillating mechanism having a predetermined inertia such as to measure for each spiral or each spiral blank a free oscillation frequency or a stiffness, and/or
- iv"- modeling in a simulation tool a plurality of spirals or of spiral blanks in an oscillating mechanism having a predetermined inertia such as to compute for each spiral or each spiral blank a free oscillation frequency or a stiffness
- v- supplying to the predicting machine, and for each spiral or each blank:

- the characteristic of the resonant frequency identified in the step iii-;
- the free oscillation frequency or the stiffness measured in the step iv'-and/or computed in the step iv"-.

19. The training method as claimed in the preceding claim, wherein the step iii- comprises a preliminary phase of identifying reference measuring points with:

- the measurement of a displacement of a plurality of predetermined points of the spiral or of the spiral blank,
- the identification of nodes from among the plurality of predetermined points, which have at least one frequency or resonance peak a displacement amplitude which is zero or less than a first threshold peak value,
- selecting reference points to be measured during the inspection from among the plurality of predetermined points, which are different from the identified nodes, and which preferably each have a displacement amplitude peak greater than a second threshold peak value.

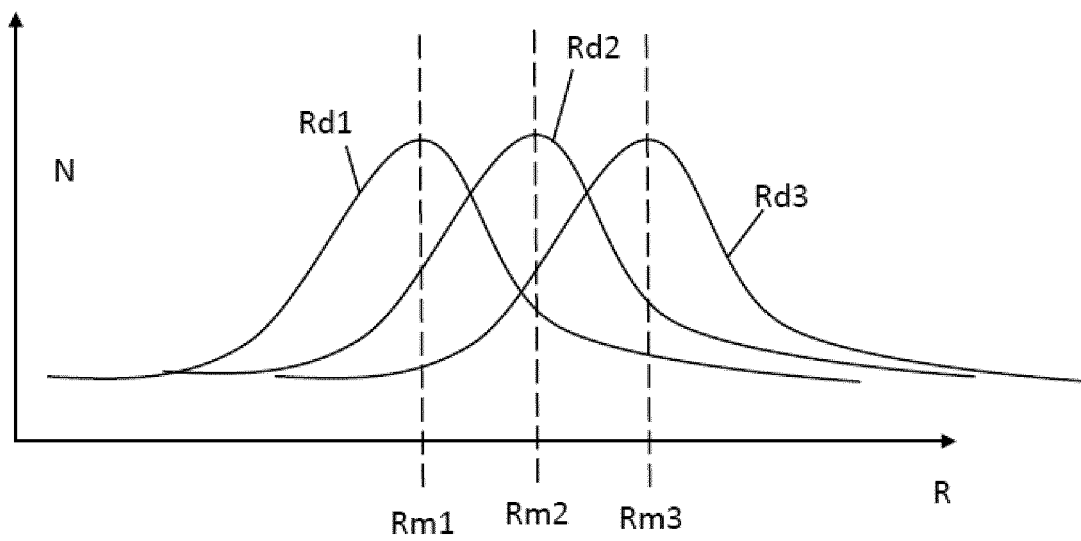


FIG. 1

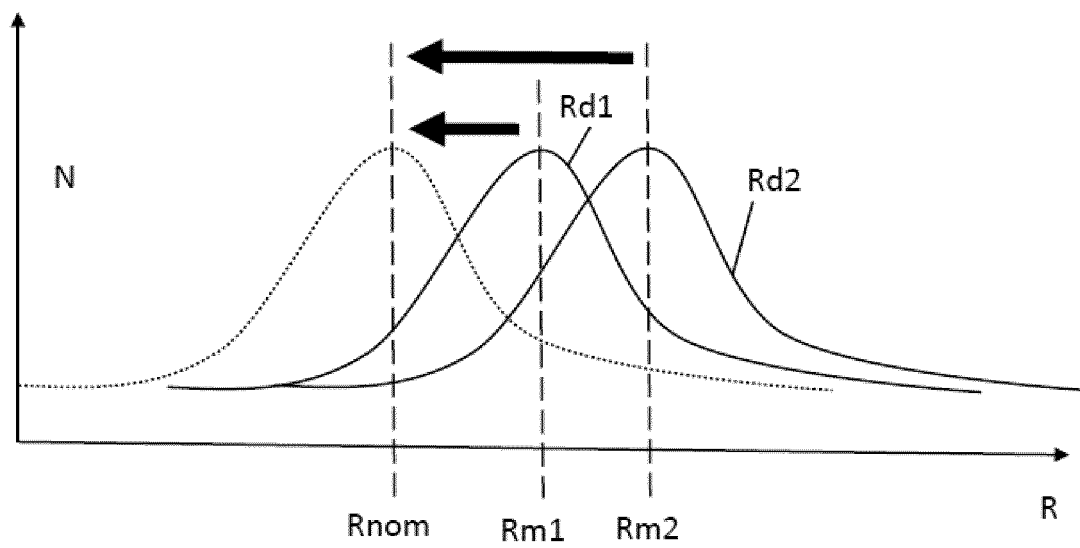


FIG. 2

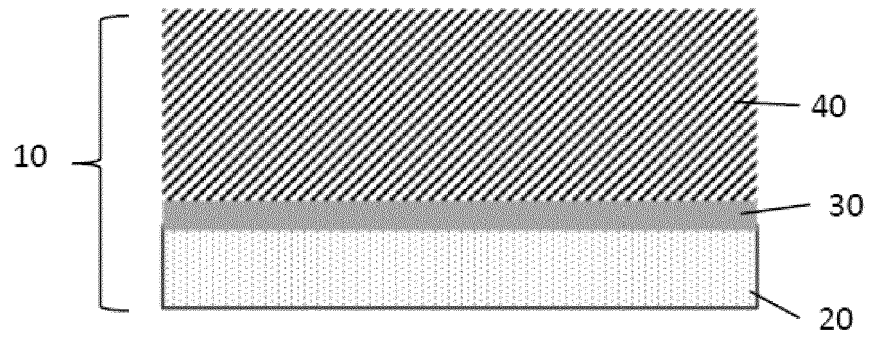


FIG. 3A

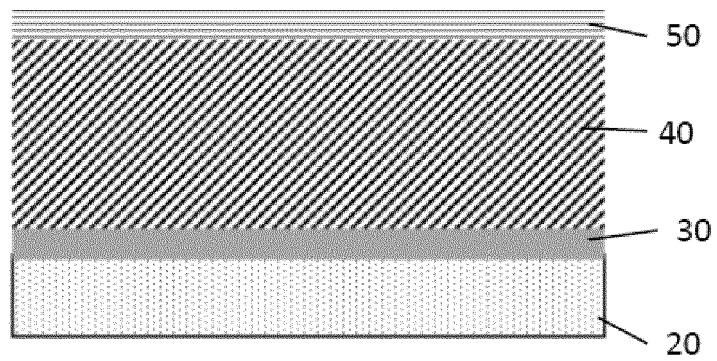


FIG. 3B

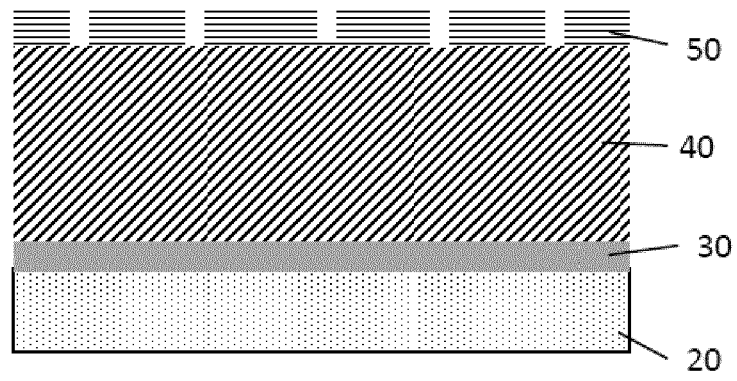


FIG. 3C

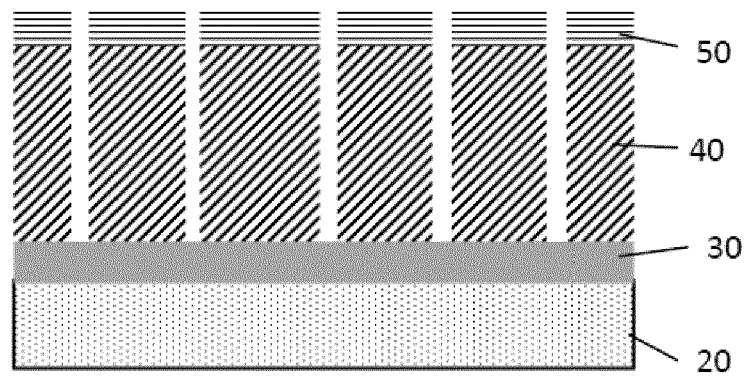


FIG. 3D

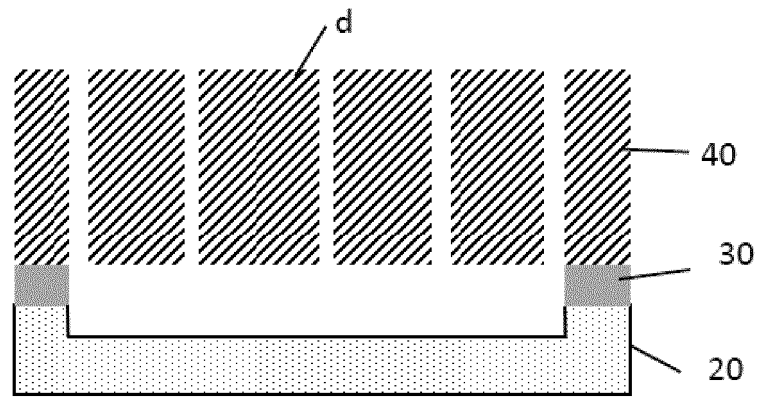


FIG. 3E

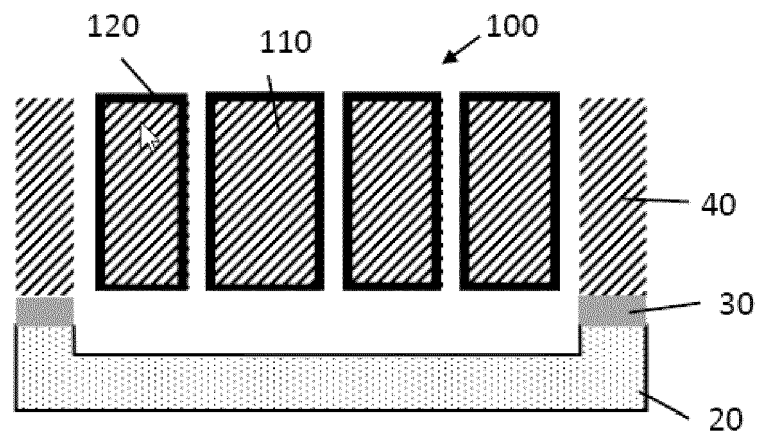


FIG. 3F

Fig. 4

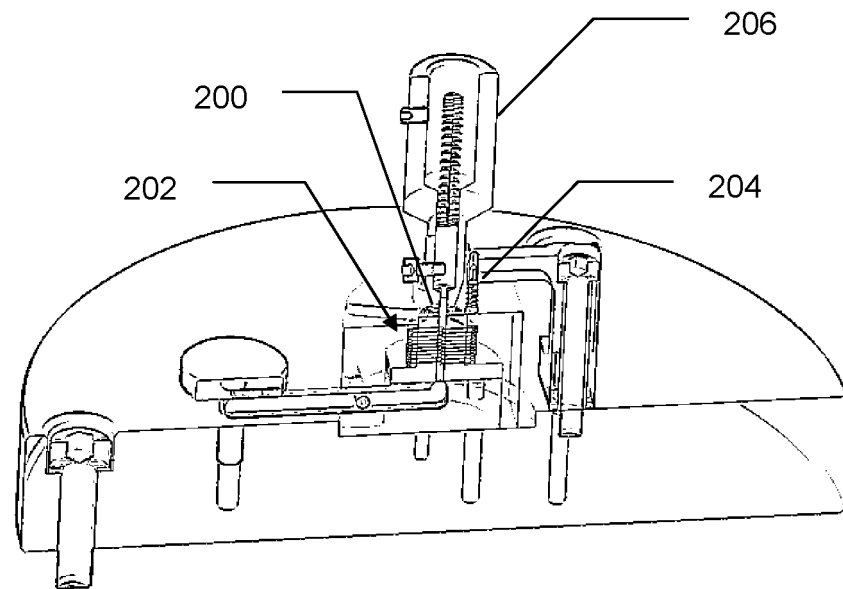


Fig. 5

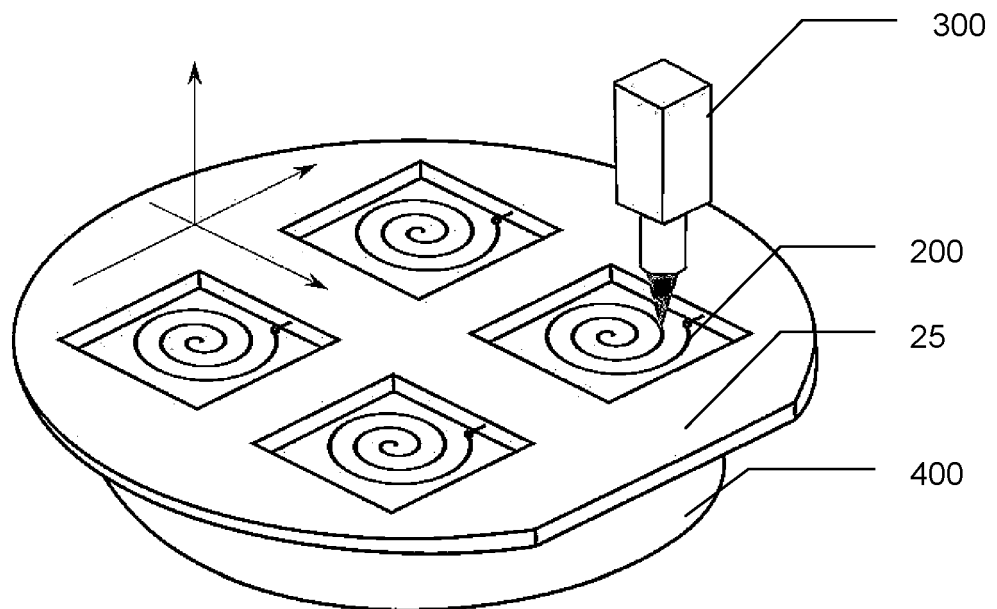


Fig. 6

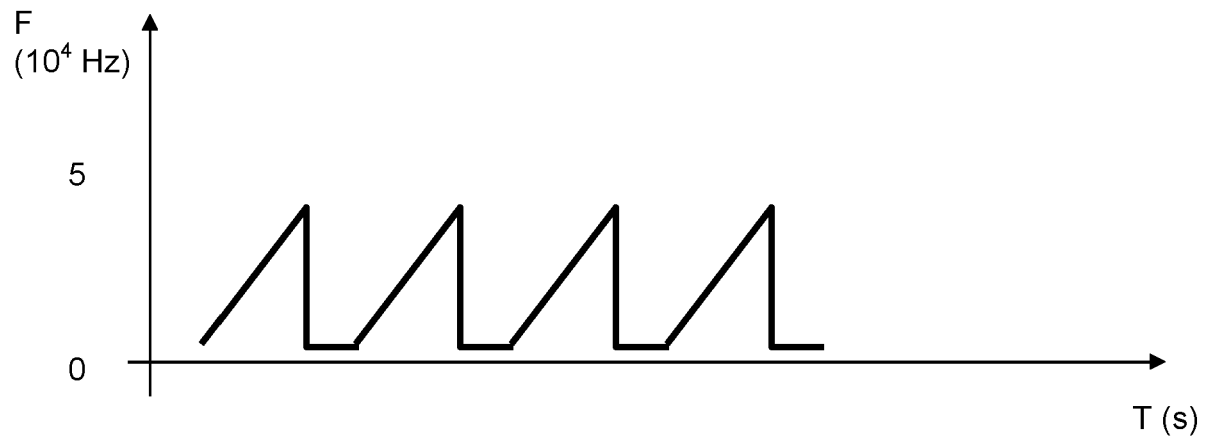


Fig. 7

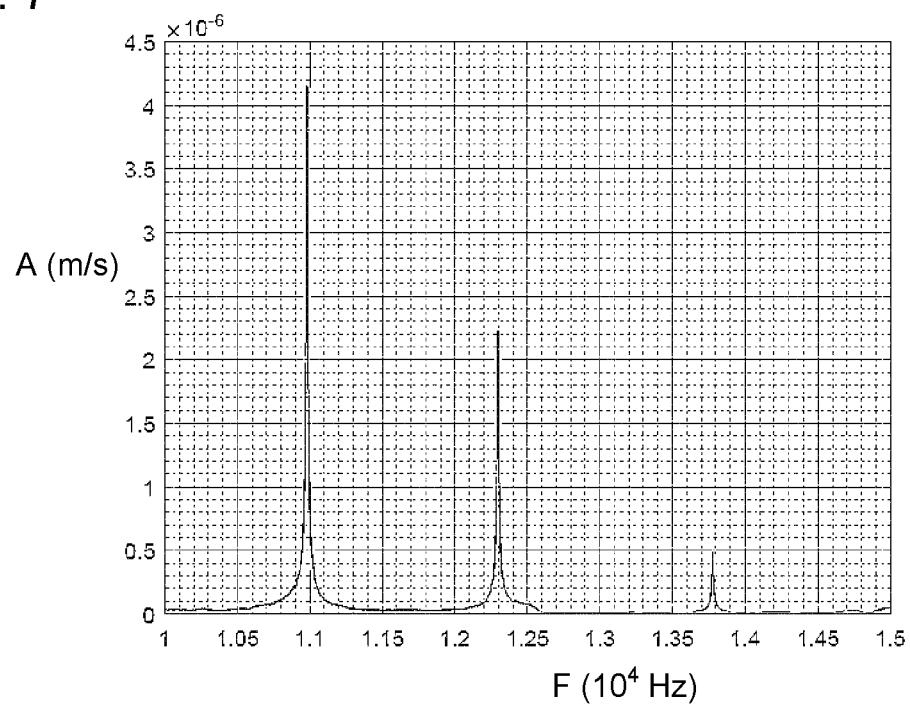


Fig. 8

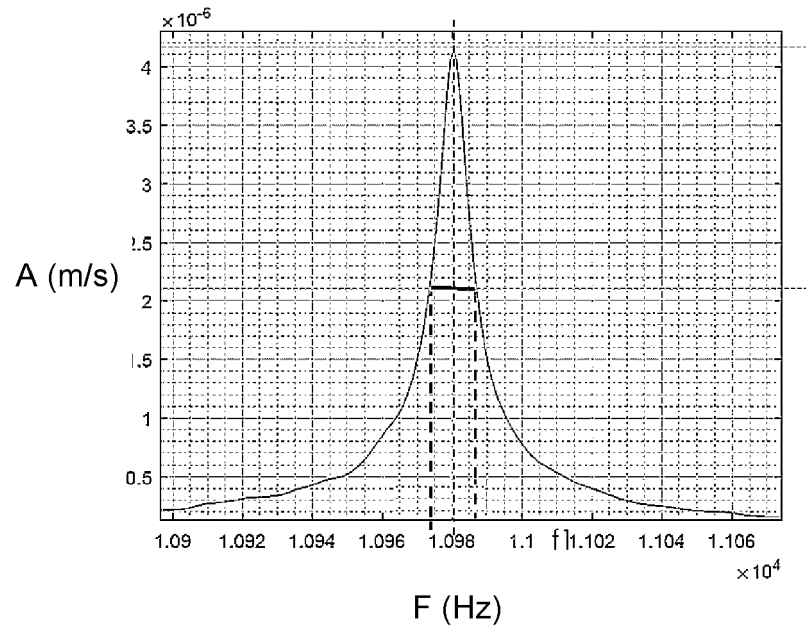


Fig. 9

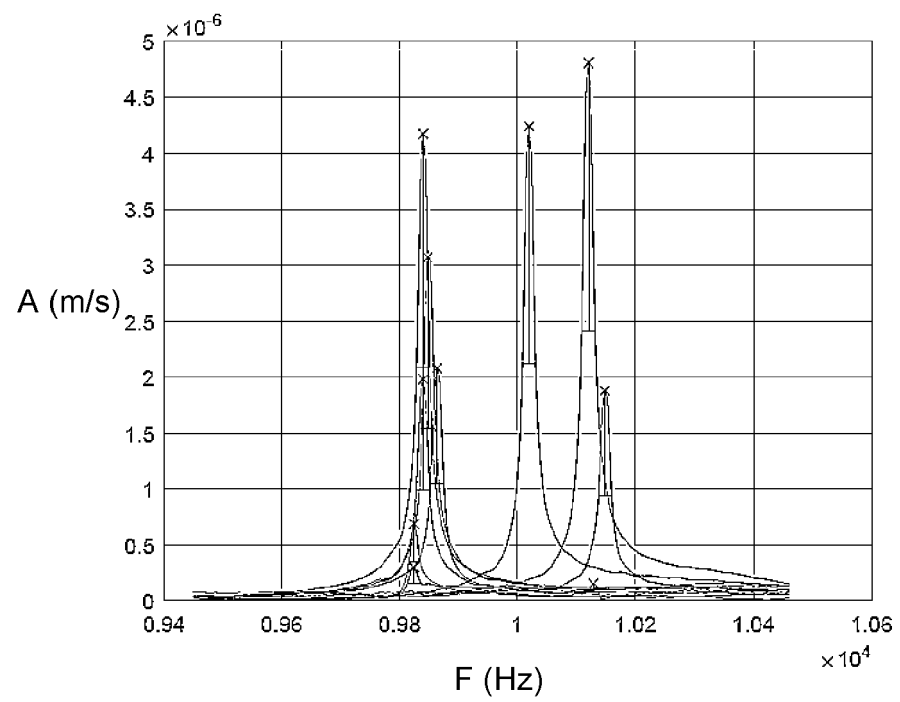
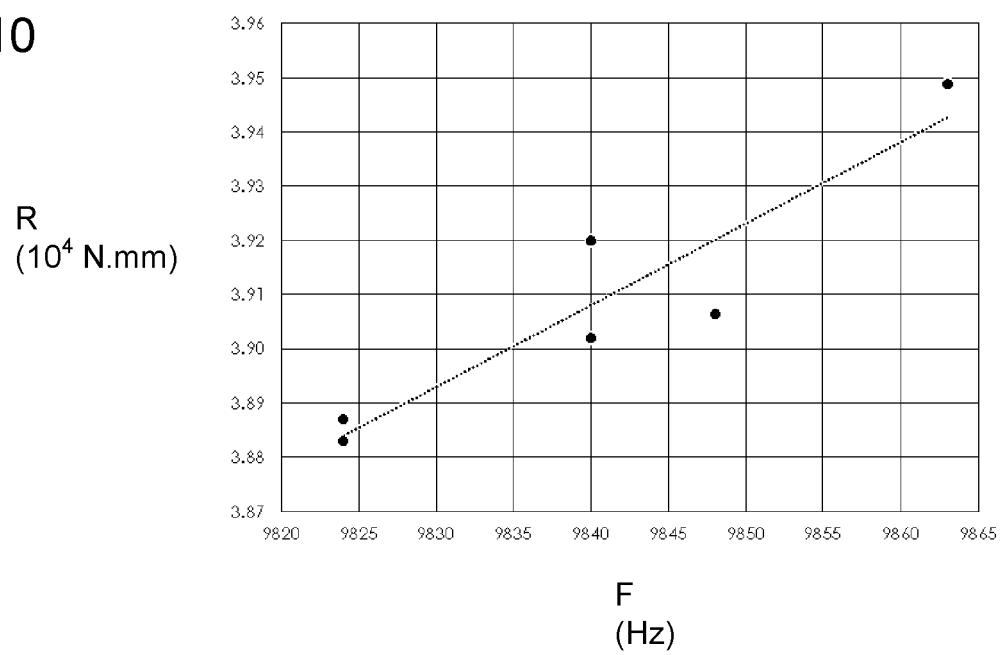


Fig. 10



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] [0135]
- CH 281496 A [0016]

Littérature non-brevet citée dans la description

- **M. VERMOT et al.** *Traité de construction horlogère*, 2011, 178-179 [0105]