(19) CONFÉDÉRATION SUISSE
INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) **CH 718 969 A2**

(51) Int. Cl.: ***G04B 17/06*** *(2006.01)*
G04B 17/32 *(2006.01)*
G04B 43/00 *(2006.01)*
G04B 15/14 *(2006.01)*

Demande de brevet pour la Suisse et le Liechtenstein
Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein

(12) DEMANDE DE BREVET

(21) Numéro de la demande: 01055/22

(22) Date de dépôt: 09.09.2022

(43) Demande publiée: 15.03.2023

(30) Priorité: 09.09.2021 EP 21195769.1

(71) Requérant:
ROLEX SA, 3-5-7, rue François Dussaud
1211 Genève 26 (CH)

(72) Inventeur(s):
Raoul Behrend, 1260 NYON (CH)

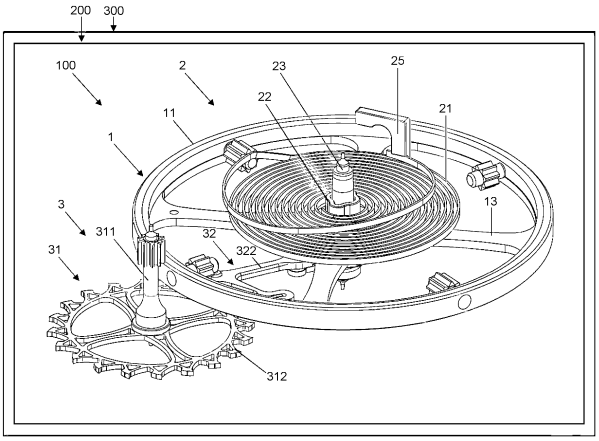
(74) Mandataire:
MOINAS & SAVOYE SARL, 27, rue de la Croix d'Or
1204 Genève (CH)

(54) Élément inertiel pour mouvement horloger, résistant aux champs magnétiques.

(57) L'invention concerne un élément inertiel (1), notamment balancier (1), pour mouvement horloger (200), l'élément inertiel comprenant une serge (11) constituée de ou comprenant un premier matériau :

– paramagnétique ou diamagnétique, et
– ayant une résistivité électrique supérieure à 15 μΩ×cm, préférablement supérieure à 20 μΩ×cm.

L'invention concerne également un oscillateur et un système réglant dont au moins un composant est réalisé dans un tel matériau, ainsi qu'une utilisation d'un tel élément inertiel dans un mouvement horloger afin d'augmenter sa résistance aux champs magnétiques et/ ou sa valeur d'intensité de champ magnétique d'arrêt.



Description

[0001] L'invention concerne un élément inertiel, notamment un balancier, pour mouvement horloger. L'invention concerne aussi un oscillateur comprenant un tel élément inertiel. L'invention concerne encore un système réglant comprenant un tel oscillateur ou un tel élément inertiel. L'invention concerne encore un mouvement horloger comprenant un tel oscillateur ou un tel élément inertiel ou un tel système réglant. L'invention concerne enfin une pièce d'horlogerie comprenant un tel mouvement horloger ou un tel oscillateur ou un tel élément inertiel ou un tel système réglant.

[0002] Dans l'ouvrage „Théorie d'horlogerie“ édité par la Fédération des Ecoles Techniques, C.-A. Reymondin et al., il est mentionné que la norme NIHS (NIHS-90-10) précise que, pour les montres antimagnétiques d'usage courant, une montre ne doit pas s'arrêter dans un champ magnétique de 4800 A/m (60 G) et doit présenter un effet résiduel ne dépassant pas 30 s/j (pour un diamètre d'encageage de plus de 20 mm). Pour les montres spéciales, il est préconisé de résoudre le problème du magnétisme en enfermant le mouvement dans un écran magnétique en mumétal, en permalloy ou en fer doux. Toutefois, une telle solution pose de nombreuses contraintes d'encombrement, de conception et d'esthétique.

[0003] Le document CH716862 décrit un mouvement horloger et mentionne des arrêts à des valeurs de champ magnétique supérieures à 3'000 G, voire 4'000 G, par la combinaison d'un spiral amagnétique“ et d'axes métalliques „amagnétiques“ de l'organe réglant.

[0004] Le document EP2979139 propose une conformation spécifique d'un axe de balancier (un axe monobloc magnétiquement inhomogène présentant des propriétés magnétiques intrinsèques non-uniformes dans son volume) permettant à des montres ayant un spiral, un corps d'ancre et une roue d'échappement amagnétiques de résister, sans s'arrêter, à des champs magnétiques de l'ordre de 1 T (10'000 G), et sans que les performances mécaniques (chronométrie et vieillissement des mobiles) soient affectées.

[0005] Le document EP2757423 concerne des axes durcis superficiellement par un traitement thermique sous atmosphère contrôlée. Il est précisé au paragraphe [0010] que : „le but de la présente invention est [...] de proposer un axe de pivotement permettant à la fois de limiter la sensibilité aux champs magnétiques et d'obtenir une dureté améliorée compatible avec les exigences de résistance à l'usure et aux chocs dans le domaine horloger“. Toutefois, aucune mention d'arrêt du mouvement sous un champ magnétique quelconque n'est relevée dans ce document.

[0006] Le document EP3258325 concerne des axes réalisés en matériau céramique qui offrent l'avantage d'être amagnétiques, et de ne pas influencer la marche de la pièce d'horlogerie lorsqu'elle est soumise à un champ magnétique, notamment un champ magnétique supérieur à 32 kA/m (400 G).

[0007] Le but de l'invention est de fournir un élément inertiel permettant d'améliorer les dispositifs horlogers connus de l'art antérieur et de résoudre les problèmes mentionnés. En particulier, l'invention propose un élément inertiel permettant à un mouvement horloger de fonctionner sans s'arrêter sous un champ magnétique intense, notamment un champ magnétique d'une intensité de 8'000 G, voire 15'000 G, voire 20'000 G, voire 30'000 G, tout en assurant une marche résiduelle inférieure à 1 s/j après une telle exposition.

[0008] Selon l'invention, un élément inertiel est défini par la revendication 1.

[0009] Des modes de réalisation de l'élément inertiel sont définis par les revendications 2 à 10.

[0010] Selon l'invention, un oscillateur est défini par la revendication 11.

[0011] Selon l'invention, un système réglant est défini par la revendication 12 ou 13.

[0012] Selon l'invention, une utilisation est définie par la revendication 14.

[0013] Selon l'invention, un mouvement horloger est défini par la revendication 15 ou 16.

[0014] Selon l'invention, une pièce d'horlogerie est définie par la revendication 17 ou 18.

[0015] Les dessins annexés représentent, à titre d'exemple, un mode de réalisation d'une pièce d'horlogerie, en particulier un mode de réalisation d'un système réglant.

La figure 1 est une vue en perspective d'un mode de réalisation d'une pièce d'horlogerie.

La figure 2 est une vue de côté du mode de réalisation du système réglant de la pièce d'horlogerie de la figure 1.

[0016] Un mode de réalisation d'une pièce d'horlogerie 300 est décrit ci-après en détail en référence aux figures 1 et 2. La pièce d'horlogerie 300 est par exemple une montre, en particulier une montre-bracelet. La pièce d'horlogerie 300 comprend un mouvement horloger 200, destiné à être monté dans un boîtier ou une boîte de pièce d'horlogerie afin de le protéger de l'environnement extérieur. Le mouvement horloger 200 peut être un mouvement mécanique, notamment un mouvement automatique, ou encore un mouvement hybride.

[0017] Le mouvement horloger 200 comprend un système réglant 100.

[0018] Le système réglant 100 comprend un oscillateur 2 et un système d'échappement 3.

[0019] L'oscillateur 2 comprend un élément inertiel 1.

[0020] Dans le cas d'un oscillateur traditionnel (comme représenté sur les figures 1 et 2), l'oscillateur comprend aussi un ressort-spiral 21 et l'élément inertiel 1 est un balancier 1 pivoté sur un bâti du mouvement horloger.

[0021] L'élément inertiel comprend une serge 11 constituée d'un premier matériau ou comprenant un premier matériau. Le premier matériau :

– est paramagnétique ou diamagnétique, et
– a une résistivité électrique supérieure à 15 μΩ×cm, préférablement supérieure à 20 μΩ×cm.

[0022] Avantageusement encore, le premier matériau est un matériau métallique et a une résistivité électrique inférieure à 100 μΩ×cm ou inférieure à 200 μΩ×cm ou inférieure à 1000 μΩ×cm.

[0023] Avantageusement encore, le premier matériau a une résistivité électrique comprise entre 100 μΩ×cm et 10^3 μΩ×cm ou comprise entre 10^3 μΩ×cm et 10^{13} μΩ×cm ou supérieure à 10^{13} μΩ×cm.

[0024] Outre la serge 11, l'élément inertiel 1 comprend :

– un moyeu 12, et/ou
– des bras 13.

[0025] Un ou plusieurs de ces éléments comprend de préférence le premier matériau ou est de préférence constitué par le premier matériau. Avantageusement, la serge, le moyeu et les bras sont venus de matière ou réalisés d'un seul tenant et sont donc constitués par le même premier matériau.

[0026] Le moyeu 12 comprend de préférence un alésage pour recevoir un axe d'élément inertiel 23 permettant de pivoter l'élément inertiel 1 sur le bâti du mouvement horloger.

[0027] Les bras 13 permettent de lier mécaniquement le moyeu 12 à la serge 11. Les bras ont de préférence une forme allongée. En particulier, les bras s'étendent radialement ou sensiblement radialement relativement à l'axe 23. Les bras peuvent être remplacés par tout autre élément permettant de lier mécaniquement ou de fixer le moyeu 12 à la serge 11 tel que, par exemple, un support. Un tel support peut être plein, à savoir qu'il ne peut être traversé selon une direction axiale parallèle à celle de l'axe 23, c'est-à-dire qu'il ne comprend pas d'ajourages le traversant. Alternativement, un tel support peut être ajouré, à savoir qu'il comprend des ajourages qui le traversent. Dans une exécution particulière d'élément inertiel, le support peut notamment présenter une forme de disque.

[0028] Dans une exécution particulière d'élément inertiel, le support peut faire office de moyeu et ainsi être confondu avec le moyeu. Alternativement ou complémentairement, la serge peut faire office de support ou être confondue avec le support, formant ainsi un disque plein ou ajouré. Ainsi, le support, le moyeu et/ou la serge peuvent être constitués du premier matériau ou comprendre le premier matériau. En particulier, le moyeu, le support et la serge peuvent être venus de matière. Alternativement encore, l'élément inertiel peut comprendre un disque avec :

– le moyeu,
– le support, et
– la serge

venus de matière.

[0029] Avantageusement, le premier matériau est :

– du CuAl7Si2, ou
– du CuNi15Sn8, ou
– du laiton sans plomb (notamment CuZn21Si3P), ou
– du NiP, ou
– du titane ou de l'alliage de titane, ou
– du Co40Cr20Ni16Mo7 (Phynox), ou
– de la céramique comme du ZrO_2 ou du Al_2O_3, ou
– du silicium, ou
– du rubis, ou
– du verre.

[0030] De préférence, la serge 11 a une forme continue (c'est-à-dire qu'il est possible de faire un tour complet de l'axe 23 en restant dans le matériau formant la serge), notamment une forme annulaire continue comme illustré aux figures 1 et 2. Avantageusement, la serge de forme continue, notamment de forme annulaire continue, est formée d'un seul matériau, de préférence d'un seul matériau conducteur comme un alliage métallique à haute résistivité électrique (par exemple une résistivité électrique supérieure à 20 μΩ×cm). En alternative, l'élément inertiel 1, en particulier la serge 11, peut comprendre plusieurs portions constituées de différents matériaux, notamment des matériaux semi-conducteurs ou isolants électriques. Chacun de ces matériaux ou certains de ces matériaux ou un de ces matériaux peuvent constituer le premier matériau. Les portions peuvent être des portions massives rapportées ou disposées sur une structure destinée à les supporter.

[0031] Alternativement, la serge 11 peut avoir une forme interrompue ou discontinue, notamment une forme annulaire interrompue ou discontinue.

[0032] Avantageusement, l'élément inertiel est monobloc. Toutefois, en alternative, l'élément inertiel peut être constitué par l'assemblage de plusieurs éléments.

[0033] De préférence, le ressort-spiral 21 est réalisé en un matériau paramagnétique ou diamagnétique et ayant une résistivité électrique supérieure à 20 μΩ×cm. Alternativement ou complémentairement, le ressort-spiral 21 a une virole 22 et/ou une bride 25 réalisée en matériau paramagnétique ou diamagnétique, notamment en titane ou en alliage de titane, et ayant une résistivité électrique supérieure à 20 μΩ×cm.

[0034] L'oscillateur 2 comprend encore l'axe d'élément inertiel 23. De préférence, l'axe d'élément inertiel 23 est réalisé en matériau paramagnétique ou diamagnétique, notamment en céramique, par exemple en zircone, ou en acier paramagnétique ou en acier paramagnétique durci en surface ou en acier paramagnétique revêtu.

[0035] En alternative ou en complément, l'axe 23 d'élément inertiel est avantageusement dénué de collerette d'appui de l'élément inertiel 1. Une telle collerette est habituellement prévue sur l'axe d'élément inertiel pour constituer une butée pour stopper l'élément inertiel relativement à l'axe lors de l'assemblage, en particulier lors du chassage, de l'élément inertiel sur l'axe.

[0036] L'oscillateur 2 comprend encore un plateau 24, en particulier un double-plateau 24, constitué de ou comprenant le premier matériau. Le plateau 24 est avantageusement rapporté sur l'axe 23 de l'élément inertiel, notamment par chassage.

[0037] En alternative à un oscillateur traditionnel décrit ci-dessus en référence à la figure 1, l'oscillateur peut comprendre un élément inertiel monté sur une structure élastiquement déformable et permettant le pivotement de l'élément inertiel par rapport à un bâti par déformation élastique de la structure élastiquement déformable.

[0038] Le système réglant 100 comprend, outre l'élément inertiel 1 décrit plus haut et/ou l'oscillateur 2 décrit plus haut, un système d'échappement 3 comprenant un ou plusieurs composants d'échappement 31, 32, notamment une roue d'échappement 31 et une ancre 32.

[0039] De préférence, la roue d'échappement 31 comprend une planche 312 et un axe 311. L'axe 311 est logé, notamment chassé, dans la planche 312 et permet de pivoter la roue d'échappement 31 sur le bâti du mouvement horloger. L'axe 311 est avantageusement réalisé en matériau paramagnétique ou diamagnétique, notamment en céramique, par exemple en zircone, ou en acier paramagnétique ou en acier paramagnétique durci en surface ou en acier paramagnétique revêtu ou en Phynox. La planche 312 est avantageusement réalisée en matériau paramagnétique ou diamagnétique, notamment en CuAl7Si2 ou en CuNi15Sn8 ou en laiton sans plomb CuZn21 Si3P ou en NiP ou en Titane ou en alliage de Titane ou en Co40Cr20Ni16Mo7 (Phynox) ou en céramique comme le ZrO_2 ou l'Al_2O_3 ou en silicium ou en rubis ou en verre.

[0040] De préférence, l'ancre 32 comprend une planche 322 et un axe 321. L'axe 321 est logé, notamment chassé, dans la planche 322 et permet de pivoter l'ancre 32 sur le bâti du mouvement horloger. L'axe 321 est avantageusement réalisé en matériau paramagnétique ou diamagnétique, notamment en céramique, par exemple en zircone, ou en acier paramagnétique ou en acier paramagnétique durci en surface ou en acier paramagnétique revêtu ou en Phynox. La planche 322 est avantageusement réalisée en matériau paramagnétique ou diamagnétique, notamment en CuAl7Si2 ou en CuNi15Sn8 ou en en laiton sans plomb CuZn21Si3P ou en NiP ou en Titane ou en alliage de Titane ou en Co40Cr20Ni16Mo7 (Phynox) ou en céramique comme le ZrO_2 ou l'Al_2O_3 ou en silicium ou en rubis ou en verre.

[0041] Les solutions décrites plus haut ont été comparées dans deux configurations. Une première configuration vise à obtenir de faibles marches résiduelles après exposition à des champs magnétiques intenses (2 T ou 20'000 G et plus). Cette première configuration consiste en un mouvement (spiral paramagnétique, balancier en CuBe, c'est-à-dire en alliage de cuivre-béryllium, notamment un alliage de cuivre-béryllium avec 2% de béryllium) dont les trois axes du système réglant (axe de balancier, tige d'ancre, pignon d'échappement) sont réalisés en matériaux paramagnétiques ou diamagnétiques, en l'occurrence respectivement en zircone, Phynox et Phynox. Pour une telle première configuration, il a été constaté que l'arrêt sous champ intervient typiquement avec un champ magnétique dont l'intensité vaut 20'000 G, ce qui est exceptionnel et nettement plus élevé que l'intensité de champ mentionnée dans les documents de l'état de l'art (notamment dans les documents CH716862 et EP2979139 et dans les normes, comme vu plus haut). Dans une deuxième configuration, l'utilisation d'un balancier en laiton sans plomb, par exemple de type CuZn21 Si3P (aussi appelé „Ecobrass“, selon l'une des solutions décrites plus haut en remplacement d'un balancier en CuBe selon la première configuration), permet encore d'augmenter la valeur limite d'intensité de champ magnétique provoquant l'arrêt du mouvement de plus de 60% (à plus de 35'000 G), comme détaillé ci-dessous. Les études de la demanderesse tendent à montrer que cet effet inattendu s'explique par une diminution de la dissipation d'énergie par courants de Foucault induits par le déplacement du balancier dans le champ magnétique, le laiton sans plomb „Ecobrass“ montrant une résistivité électrique au moins deux fois plus élevée que celle du CuBe. L'utilisation d'un matériau à résistivité électrique encore plus élevée, comme le NiP, le Silicium, la céramique (zircone et autres), ou le verre devrait permettre d'atteindre des seuils d'arrêt sous champ encore plus importants. Cependant, le seuil d'arrêt sous champ magnétique n'évolue pas de façon linéaire avec la résistivité électrique. Le comportement va dépendre entre autre de la configuration (et notamment des matériaux utilisés pour les autres composants, et/ou de la présence éventuelle de composants propices à la génération de courants de Foucault sur le balancier, etc), et de la géométrie du balancier (serge continue ou non). De façon surprenante et inattendue, l'augmentation du seuil d'arrêt sous

champ magnétique est très importante en augmentant la résistivité pour un matériau métallique. Une augmentation de plusieurs ordres de grandeurs de la résistivité (par l'utilisation de matériaux semi-conducteurs ou isolants notamment) va selon toute vraisemblance permettre d'augmenter encore le seuil d'arrêt sous champ, mais pas de façon proportionnelle.

[0042] Des mesures de performances d'arrêt sous champ ont été réalisées en utilisant des mouvements munis de diverses variantes de composants au niveau de l'échappement et de l'oscillateur (axes, balancier), afin d'analyser notamment l'influence de l'utilisation d'un balancier en laiton sans plomb.

[0043] Comme il a été constaté que la résistance à l'arrêt sous champ d'une première configuration de mouvement dotée d'axes „amagnétiques“, notamment de la première configuration, dépasse 15'000 G, les mesures ont consisté à déterminer l'intensité d'arrêt sous champ effective à l'aide d'un électro-aimant supraconducteur permettant d'atteindre des intensités de champ magnétique de l'ordre de 10 T (100'000 G).

Configurations testées :

[0044] Les essais portent sur deux configurations de mouvement, testées chacune sur trois pièces (mouvements avec cadran et aiguilles) (Tableau 1). Les mouvements des deux configurations comprennent un spiral paramagnétique en alliage NbZr, des planches d'ancre et de roue d'échappement en NiP paramagnétique, un plateau du balancier en laiton sans plomb „Ecobrass“. Ils comprennent également l'automate, l'entretoise et le cadran (avec base en laiton), et les aiguilles.

Type	Axe de balancier	Balancier	Tige d'ancre	Pignon d'échappement
Balancier CuBe (première configuration)	Zircone	Série (CuBe)	Phynox	Phynox
Balancier Ecobrass (deuxième configuration)	Zircone	Laiton sans plomb „Ecobrass“	Phynox	Phynox

Tableau 1 : Configurations testées (matériaux constituant différents composants).

[0045] À partir de la première configuration, il s'agit d'évaluer l'influence potentielle du remplacement d'un balancier en CuBe par un balancier en laiton sans plomb „Ecobrass“.

Protocole :

[0046] Les mesures ont été réalisées avec un électro-aimant supraconducteur du fabricant Oxford Instruments permettant d'appliquer un champ magnétique jusqu'à 12 T (120'000 G) avec une homogénéité du champ < ± 2%. La température de la zone de travail est de 20 ± 2 °C.

[0047] Les électro-aimants supraconducteurs permettant d'atteindre des intensités de champ supérieures à 15'000 G ont l'inconvénient de ne pas présenter d'accès visuel à l'échantillon.

[0048] La détection de l'arrêt sous champ a donc été effectuée par prises d'état à différents paliers d'intensité du champ :

- Avant exposition au champ magnétique, la pièce est remontée à un état d'armage optimal (0.5 tour) et une prise d'état initiale h0 est effectuée (mise en marche du mouvement à 00h00 en parallèle d'un chronographe de référence H0). On considère l'état initial E0 = h0 - H0 = 0.
- Après exposition à une intensité donnée du champ magnétique, en particulier au minimum après 20 minutes de fonctionnement sous champ, on procède à une deuxième prise d'état de la pièce h1 et du chronographe de référence H1 (placée hors du champ magnétique), l'état étant E1 = h1 - H1.

[0049] Le critère considéré de détection de l'arrêt se base sur l'état E1 :

On considère qu'il n'y a pas d'arrêt sous champ si E1 > -2 min, en considérant ±1 minute d'incertitude sur chaque prise d'état liée aux manipulations et relevés, et en supposant qu'une forte dérive de marche sous champ n'a qu'un impact négligeable sur ces prises d'état (en considérant une marche sous champ de ±5'000 s/j, la dérive sur 30 minutes de mesure vaut environ 100 s). En pratique, il a été constaté que la signature d'un arrêt sous champ est claire et univoque. En effet, les différences d'état mesurées sont groupées en deux populations :

- l'une centrée autour de 0 (valeurs entre 0 et -2 min, moyenne et écart-type de -0.2±0.5 min sur 20 mesures) correspondant à une absence d'arrêt, et
- l'autre centrée autour de -20 min (valeurs entre -19 et -31 minutes, moyenne et écart-type de -20.5±6.0 min sur 11 mesures) correspondant à un arrêt sous champ.

[0050] Cette méthode implique de devoir procéder par expositions successives selon différents paliers à différentes intensités de champ. On applique un champ initial de 2 T (20'000 G), puis on augmente l'intensité par palier de 0.25 T ou de 0.5 T (2'500 G ou 5'000 G), avec une stabilisation au champ maximal de 3 minutes au moins. Les mesures sont réalisées simultanément sur plusieurs mouvements.

Résultats :

[0051] Première configuration avec balancier en CuBe :

La synthèse des mesures sur la première configuration montre de manière nette que l'arrêt sous champ intervient entre 2.25 T et 2.50 T (entre 22'500 G et 25'000 G).

[0052] Deuxième configuration avec balancier en laiton sans plomb „Ecobrass“ :

L'unique arrêt dans cette configuration a été constaté après exposition à 4 T. Le fait d'atteindre des performances entre 3.5 T et 4 T (35'000 G à 40'000 G) montre clairement que le balancier en laiton sans plomb „Ecobrass“, en particulier le couple balancier-plateau en laiton sans plomb „Ecobrass“, apporte un gain très significatif par rapport à la première configuration.

[0053] On obtient donc un gain supplémentaire d'environ 60% d'intensité limite de champ magnétique avec un balancier en laiton sans plomb „Ecobrass“ lorsqu'on dispose des trois axes amagnétiques (axe de balancier, tige d'ancre, pignon d'échappement) dans cette configuration de test.

[0054] Lorsque seul l'axe de balancier est en zircone et que les deux autres axes sont en matériau standard (acier sans plomb Finemac), le remplacement du balancier en CuBe par un balancier en laiton sans plomb „Ecobrass“ permet de doubler l'intensité du champ magnétique d'arrêt du mouvement, à partir cependant d'une valeur d'intensité de champ magnétique inférieure à celle mesurée pour la première configuration du Tableau 1 décrite plus haut. On obtient donc un gain en arrêt sous champ magnétique d'environ un facteur deux dans ce cas.

[0055] En ce qui concerne la marche résiduelle (variation de marche consécutive à l'application du champ magnétique), il a été mesuré une marche résiduelle d'environ 1 s/j (soit dans l'erreur de mesure) après exposition de la deuxième configuration à 100'000 G. Les performances sont là aussi excellentes.

[0056] Les résultats montrent qu'il est très avantageux de combiner l'utilisation de géométries favorables et de matériaux paramagnétiques ou diamagnétiques pour le spiral et pour les axes, notamment les axes du régulateur (balancier, ancre, roue d'échappement), avec un matériau particulier pour le balancier et son plateau. L'effet du changement du matériau du balancier est inattendu et surprenant. Une piste est donnée par le fait que le laiton sans plomb présente une résistivité plus élevée que le CuBe utilisé couramment pour les balanciers et plateaux.

[0057] En effet, un composant conducteur en rotation dans un champ magnétique, comme un oscillateur balancier-spiral, est le siège de courants induits, appelés courants de Foucault.

[0058] La puissance dissipée sous forme de courants de Foucault, par unité de volume, est donnée par l'expression

$$p = \frac{\pi^2}{6} \times \frac{e^2 {B_{max}}^2 f^2}{\rho_e},$$

où f est la fréquence de la sinusoïde de variation du champ magnétique et Bmax est l'amplitude du champ sinusoïdal, ρ_e est la résistivité électrique du matériau, e l'épaisseur (mesurée perpendiculairement à B). B_{max} est à considérer comme l'amplitude de la partie variable du champ, qui va générer un champ électrique. La puissance totale est P=pxV où V est le volume sujet aux courants de Foucault.

[0059] Une estimation indique que, pour un champ magnétique extérieur de 1 T appliqué sur une pièce d'horlogerie ayant un balancier avec une serge continue en CuBe (première configuration), les pertes par courants de Foucault au niveau d'un système réglant cadencé à 4 Hz sont supérieures à la moitié de la puissance disponible à la roue d'échappement. Pour des géométries d'oscillateurs complexes, seule l'analyse par éléments finis peut fournir des valeurs précises. Toutefois, cela ne change rien aux moyens nécessaires pour limiter au maximum les pertes dues aux courants de Foucault : l'équation ci-dessus suggère d'utiliser, pour la serge et si possible pour les bras du balancier et de même pour le plateau, un matériau paramagnétique ou diamagnétique avec une résistivité électrique la plus élevée possible - par exemple de la céramique, du verre (Zerodur) ou du silicium non-dopé. Les résultats obtenus montrent cependant, de façon surprenante, que l'utilisation d'un matériau conducteur mais plus résistif permet déjà d'obtenir un gain substantiel, en particulier pour une serge continue telle qu'illustrée aux figures 1 et 2.

Choix des matériaux :

[0060] Comme mentionné ci-dessus, l'effet dissipatif lié à la génération de courants de Foucault est inversement proportionnel à la résistance électrique du composant et contribue à péjorer les performances du système réglant dans un champ magnétique. Il apparaît donc possible d'éliminer ou du moins de limiter cette perte par l'emploi d'un matériau à résistivité électrique élevée.

[0061] Le laiton sans plomb, comme par exemple l'alliage CuZn21 Si3P (aussi appelé „Ecobrass“) présente l'intérêt par rapport au cuivre-béryllium (CuBe) d'avoir une résistivité environ 2 à 3 fois plus élevée (Tableau 2) en gardant une masse volumique comparable (et donc une inertie de balancier comparable pour les mêmes dimensions de ce composant).

[0062] On peut donc s'attendre à ce que la perte énergétique subie par le système réglant sous un champ magnétique soit réduite d'un facteur 2 à 3 avec l'emploi de laiton sans plomb „Ecobrass“ par rapport au CuBe. Les résultats montrent que cet effet est vérifié pour ce qui concerne l'intensité d'arrêt sous champ en mouvement.

Matériau	État	Masse volumique [g×cm^3]	Résistivité électrique ρ[μΩ×cm]
Cuivre-Béryllium (CuBe2)	Après durcissement	84	6-8 (conductivite 13-16 MS/m)
AL7 (CuAl7Si2)		77	-20 (conductivité 5 MS/m)
Ecobrass (CuZn21Si3P)		83	-22 (conductivite 45 MS/m)
Toughmet (CuNi15Sn8)		89	-25 (conductivite 4 MS/m)
NiP	10% P	80	100
Titane	Grade 5	45	170
Si non dope	-	23	6 4 10^{10}
Al2O3	-	38	10^{15}
Verre (Zerodur)	-	25	2 6 10^{15}
ZrO2	-	59	10^{23}

Tableau 2 : Comparaison des masses volumiques et des résistivités électriques de différents matériaux.

[0063] Le Tableau 2 montre également l'intérêt de considérer d'autres matériaux conducteurs, voire des matériaux semi-conducteurs ou isolants pour réaliser au moins la serge du balancier ou de l'élément inertiel. On estime, en général, que les matériaux conducteurs montrent une résistivité électrique comprise entre 1 et 10^3 μΩ×cm, les matériaux semi-conducteurs entre 10^3 et 10^{13} μΩ×cm et les isolants au-dessus de 10^{13} μΩ×cm (facteur de conversion 1 Q×m = 10^8 μΩ×cm).

[0064] Dans les matériaux utilisés pour réaliser des composants horlogers du mouvement, le NiP électrodéposé, le Si et la zircone ZrO2 semblent ainsi particulièrement intéressants, notamment pour obtenir des performances encore supérieures à celles de composants en laiton sans plomb. Dans un tel cas, cependant, l'utilisation de matériaux métalliques à faible résistivité est à éviter, comme par exemple l'utilisation de segments en or déposés sur un composant en matériau semi-conducteur ou isolant pour en augmenter l'inertie. En effet, une telle utilisation nuit fortement aux performances sous champ magnétique de l'élément inertiel obtenu.

[0065] Il peut également être avantageux d'utiliser une serge avec une forme interrompue ou discontinue pour limiter la dissipation par courants de Foucault, ou d'utiliser une serge comprenant plusieurs portions constituées de matériaux différents ou comprenant des matériaux différents, notamment avec des matériaux semi-conducteurs ou isolants électriques intercalés entre des portions constituées de matériaux conducteurs.

[0066] Il peut par exemple être avantageux d'utiliser une serge de forme annulaire formée de portions ou segments dans le sens orthoradial constitués ou comprenant des matériaux différents. Alternativement, il peut être avantageux que la serge soit formée d'une succession de couches ou portions de matériaux différents (empilées selon une direction axiale parallèle à celle de l'axe 23 du balancier), par exemple une serge réalisée par croissances successives de couches de matériaux de différentes résistivités électriques, par exemple de couches alternatives de matériaux isolants et conducteurs. Alternativement, il peut être avantageux que la serge soit formée d'une succession de couches ou portions de matériaux différents empilées selon une direction radiale à l'axe 23 du balancier. Alternativement encore, il peut être avantageux que la serge soit formée d'un composite de différents matériaux, notamment des matériaux ayant différentes résistivités

électriques, par exemple formée d'un composite avec une matrice en céramique isolante formant un réseau continu, dans laquelle on infiltre un matériau conducteur métallique ou avec une matrice en céramique isolante dans laquelle on disperse des particules métalliques.

[0067] Les études et essais décrits précédemment ont notamment permis de mettre en évidence l'influence du matériau du balancier sur la tenue en arrêt sous champ magnétique de configurations avec axe de balancier en zircone, en lien avec ses propriétés électriques. L'utilisation d'un matériau à haute résistivité semble être clé pour obtenir des valeurs d'arrêt sous champ très élevées, et donc des performances encore accrues de résistance aux champs magnétiques.

[0068] La modification du matériau d'un balancier avec serge continue au laiton sans plomb „Ecobrass“, qui montre une résistivité doublée, voire triplée, (22 μΩ·cm) par rapport au CuBe (6-8 μΩ·cm), permet ainsi un gain très significatif de 60%, respectivement de 100%, selon les deux variantes testées. La valeur d'arrêt sous champ obtenue sur un calibre de série modifié (comprenant les trois axes du régulateur en matériau amagnétique -paramagnétique ou diamagnétique-, un balancier avec serge continue et un plateau en laiton sans plomb „Ecobrass“) est supérieure à 35'000 G, ce qui est absolument remarquable. De plus, l'utilisation d'un balancier monométallique muni d'une serge ou d'une jante annulaire continue, réalisée d'un seul tenant et dans le même matériau, comme illustré en figures 1 et 2, permet de tirer parti des moyens de fabrication, d'équilibrage et d'assemblage usuels, sans avoir à gérer l'usinage ou l'équilibrage complexe lié à un balancier à serge discontinue ou à serge coupée ou à serge bi-métallique. Le choix d'un matériau métallique à plus haute résistivité électrique, notamment d'une résistivité supérieure à 20 μΩ×cm, notamment en laiton sans plomb, par exemple en laiton sans plomb CuZn21Si3P, pour un balancier monométallique à serge continue permet de façon surprenante d'améliorer très significativement le comportement du mouvement horloger sous champ magnétique, par la diminution des courants de Foucault.

[0069] La modification du matériau de la serge vers un matériau encore moins conducteur (plus résistif), comme le NiP, le silicium, la céramique, ou le verre, est envisagé pour obtenir des pièces d'horlogerie insensibles à de très hautes intensités de champs magnétiques du point de vue de l'arrêt sous champ.

[0070] De préférence, en conséquence des solutions décrites plus haut, selon l'invention, l'oscillateur 2 comprend des composants agencés et/ou configurés de sorte que l'oscillateur et/ou le mouvement et/ou la pièce d'horlogerie présente une valeur d'intensité de champ magnétique d'arrêt supérieure ou égale à 20'000 G ou supérieure ou égale à 35'000 G.

[0071] De même, de préférence, selon l'invention, le système réglant 100 comprend des composants agencés et/ou configurés de sorte que le système réglant et/ou le mouvement et/ou la pièce d'horlogerie présente une valeur d'intensité de champ magnétique d'arrêt supérieure ou égale à 20'000 G ou supérieure ou égale à 35'000 G.

[0072] De même, de préférence, selon l'invention, le mouvement 200 comprend des composants agencés et/ou configurés de sorte que le mouvement présente une valeur d'intensité de champ magnétique d'arrêt supérieure ou égale à 20'000 G ou supérieure ou égale à 35'000 G.

[0073] De même, de préférence, selon l'invention, la pièce d'horlogerie 300 comprend des composants agencés et/ou configurés de sorte que la pièce d'horlogerie présente une valeur d'intensité de champ magnétique d'arrêt supérieure ou égale à 20'000 G ou supérieure ou égale à 35'000 G. Avantageusement, la pièce d'horlogerie ne comprend pas d'écran magnétique (notamment en mumétal, en permalloy ou en fer doux) enfermant le mouvement.

[0074] Cette valeur d'intensité de champ magnétique d'arrêt est définie selon le critère de détection d'arrêt associé au protocole décrit plus haut. Ce protocole est toutefois appliqué (avec les adaptations nécessaires) soit à l'oscillateur seul, soit au système réglant seul, soit au mouvement horloger seul, soit à la pièce d'horlogerie.

[0075] Ainsi, les éléments inertiels, les oscillateurs ou les systèmes réglants décrits précédemment peuvent être utilisés de manière dans un mouvement horloger ou dans une pièce d'horlogerie afin d'augmenter :

– sa résistance aux champs magnétiques, et/ou
– sa valeur d'intensité de champ magnétique d'arrêt.

[0076] Quel que soit le mode de réalisation ou la variante, la serge peut présenter la même géométrie ou sensiblement la même géométrie de section droite (selon un plan passant par l'axe de pivotement du balancier) quel que soit le lieu considéré de la serge. Par exemple, la serge peut seulement présenter des variations de cette section au niveau de moyens de réglage du balourd et/ou de l'inertie, comme :

– des trous taraudés s'étendant radialement (relativement à l'axe du balancier) au travers de la serge et destinés à recevoir des vis de réglage, et/ou
– des goujons fixés à la serge, s'étendant radialement (relativement à l'axe du balancier) et destinés à recevoir des écrous de réglage. Alternativement, la serge peut ne pas présenter de moyen de réglage du balourd et/ou de l'inertie et présenter la même géométrie ou sensiblement la même géométrie de section droite quel que soit le lieu considéré de la serge.

[0077] Quel que soit le mode de réalisation ou la variante, la serge peut être contenue entre :

– un premier cylindre de plus petit rayon R contenant tout le balancier, et
– un deuxième cylindre (coaxial au premier cylindre) et présentant un rayon supérieur à 0.9×R.

[0078] Notamment, la partie annulaire de la serge, à l'exclusion des variations de section au niveau de moyens de réglage du balourd et/ou de l'inertie comme des décrochements ou des goujons ou des plots, peut être contenue entre :

– un premier cylindre de plus petit rayon R contenant tout le balancier, et
– un deuxième cylindre (coaxial au premier cylindre) et présentant un rayon supérieur à 0.9×R.

[0079] Quel que soit le mode de réalisation ou la variante, la serge peut constituer au moins 85 % du moment d'inertie du balancier autour de son axe de pivotement.

[0080] Notamment, la partie annulaire de la serge, à l'exclusion des variations de section au niveau de moyens de réglage du balourd et/ou de l'inertie comme des décrochements ou des goujons ou des plots et à l'exclusion des moyens de réglage du balourd et/ou de l'inertie, peut constituer au moins 85 % du moment d'inertie du balancier autour de son axe de pivotement.

[0081] Quel que soit le mode de réalisation ou la variante, le balancier a de préférence une structure comprenant exclusivement :

– une serge, et
– un moyeu, et
– des bras de liaison mécanique de la serge au moyeu, et
– éventuellement, des moyens de réglage du balourd et/ou de l'inertie du balancier.

Revendications

1. Élément inertiel (1), notamment balancier (1), pour mouvement horloger (200), l'élément inertiel comprenant une serge (11) constituée de ou comprenant un premier matériau :
   – paramagnétique ou diamagnétique, et
   – ayant une résistivité électrique supérieure à 15 μΩ×cm, préférablement supérieure à 20 μΩ×cm.
2. Élément inertiel (1) selon la revendication 1, caractérisé en ce que le premier matériau est un matériau métallique et a une résistivité électrique inférieure à 100 μΩ×cm ou inférieure à 200 μΩ×cm ou inférieure à 1000 μΩ×cm.
3. Élément inertiel (1) selon la revendication 1, caractérisé en ce que le premier matériau est :
   – un matériau conducteur ayant une résistivité électrique comprise entre 100 μΩ×cm et 10^3 μΩ×cm, ou
   – un matériau semi-conducteur ayant une résistivité électrique comprise entre 10^3 μΩ×cm et 10^{13} μΩ×cm, ou
   – un matériau isolant ayant une résistivité électrique supérieure à 10^{13} μΩ×cm.
4. Élément inertiel (1) selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que l'élément inertiel (1) comprend des bras (13) ou un support relié(s) à la serge, les bras ou le support étant constitué(s) de ou comprenant le premier matériau.
5. Élément inertiel (1) selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que l'élément inertiel (1) comprend un moyeu (12) relié à des bras (13) ou à un support, le moyeu étant constitué de ou comprenant le premier matériau.
6. Élément inertiel (1) selon la revendication 4, caractérisé en ce que l'élément inertiel (1) comprend un moyeu (12) relié aux bras ou au support, le moyeu étant constitué de ou comprenant le premier matériau.
7. Élément inertiel (1) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le premier matériau est :
   – du CuAl7Si2, ou
   – du CuNi15Sn8, ou
   – du laiton sans plomb (notamment CuZn21Si3P), ou
   – du NiP, ou
   – du Titane ou de l'alliage de Titane, ou
   – du Co40Cr20Ni16Mo7 (Phynox), ou
   – de la céramique comme du ZrO_2 ou du Al_2O_3, ou
   – du silicium, ou
   – du rubis, ou
   – du verre.
8. Élément inertiel (1) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la serge (11) a une forme continue, notamment une forme annulaire continue.
9. Élément inertiel (1) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'élément inertiel (1), en particulier la serge (11), comprend plusieurs portions constituées avec des matériaux différents, notamment des matériaux semi-conducteurs ou isolants électriques.
10. Élément inertiel (1) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'élément inertiel est monobloc ou résulte d'un assemblage d'éléments constitutifs.
11. Oscillateur (2) comprenant un élément inertiel (1) selon l'une des revendications 1 à 10 et/ou :
   – un ressort-spiral (21) paramagnétique ou diamagnétique réalisé en un matériau ayant une résistivité électrique supérieure à 20 μΩ×cm, et/ou

– un ressort-spiral (21) ayant une virole (22) et/ou une bride (25) paramagnétique ou diamagnétique réalisée en un matériau ayant une résistivité électrique supérieure à 20 μΩ×cm, et/ou
– un axe d'élément inertiel (23) en matériau paramagnétique ou diamagnétique, notamment en céramique, par exemple en zircone, ou en acier paramagnétique ou en acier paramagnétique durci en surface ou en acier paramagnétique revêtu, et/ou
– un axe d'élément inertiel (23) dénué de collerette d'appui de l'élément inertiel (1), et/ou
– un plateau (24), en particulier un double-plateau (24), constitué de ou comprenant le premier matériau.

12. Système réglant (100) comprenant :
– un élément inertiel (1) selon l'une des revendications 1 à 10 et/ou un oscillateur (2) selon la revendication 11, et
– un système d'échappement (3) comprenant au moins un composant d'échappement (31, 32) comprenant :
– un axe (311, 321) en matériau paramagnétique ou diamagnétique, notamment en céramique, par exemple en zircone, ou en acier paramagnétique ou en acier paramagnétique durci en surface ou en acier paramagnétique revêtu, et/ou
– une planche (312, 322) en matériau paramagnétique ou diamagnétique, notamment en CuAl7Si2 ou en CuNi15Sn8 ou en laiton sans plomb (notamment CuZn21Si3P) ou en NiP ou en Titane ou en alliage de Titane ou en Co40Cr20Ni16Mo7 (Phynox) ou en céramique comme le ZrO_2 ou l'Al_2O_3 ou en silicium ou en verre ou en rubis.

13. Système réglant (100) comprenant :
– un élément inertiel (1) et/ou un oscillateur (2), et
– un système d'échappement (3) comprenant au moins un composant d'échappement (31, 32) comprenant :
– un axe (311, 321) en matériau paramagnétique ou diamagnétique, notamment en céramique, par exemple en zircone, ou en acier paramagnétique ou en acier paramagnétique durci en surface ou en acier paramagnétique revêtu, et/ou
– une planche (312, 322) en matériau paramagnétique ou diamagnétique, notamment en CuAl7Si2 ou en CuNi15Sn8 ou en laiton sans plomb (notamment CuZn21Si3P) ou en NiP ou en Titane ou en alliage de Titane ou en Co40Cr20Ni16Mo7 (Phynox) ou en céramique comme le ZrO_2 ou l'Al_2O_3 ou en silicium ou en verre ou en rubis.

14. Utilisation d'un élément inertiel selon l'une des revendications 1 à 10 ou d'un oscillateur (2) selon la revendication 11 ou d'un système réglant (100) selon l'une des revendications 12 et 13 dans un mouvement horloger (200) ou dans une pièce d'horlogerie (300) afin d'augmenter :
– sa résistance aux champs magnétiques, et/ou
– sa valeur d'intensité de champ magnétique d'arrêt.

15. Mouvement horloger (200), comprenant :
– un élément inertiel (1) selon l'une des revendications 1 à 10, et/ou
– un oscillateur (2) selon la revendication 11, et/ou
– un système réglant (100) selon la revendication 12 ou 13.

16. Mouvement horloger (200), comprenant :
– un élément inertiel (1), et/ou
– un oscillateur (2), et/ou
– un système réglant (100),
les composants du mouvement horloger et/ou de l'élément inertiel et/ou de l'oscillateur et/ou du système réglant étant agencés et/ou configurés de sorte que le mouvement présente une valeur d'intensité de champ magnétique d'arrêt supérieure ou égale à 20'000 G ou supérieure ou égale à 35'000 G.

17. Pièce d'horlogerie (300), notamment montre-bracelet (300), comprenant un mouvement horloger (200) selon la revendication 15 ou 16 et/ou un système réglant (100) selon la revendication 12 ou 13 et/ou un oscillateur (2) selon la revendication 11 et/ou un élément inertiel (1) selon l'une des revendications 1 à 10.

18. Pièce d'horlogerie (300), notamment montre-bracelet (300), comprenant :
– un élément inertiel (1), et/ou
– un oscillateur (2), et/ou
– un système réglant (100), et/ou
– un mouvement horloger (200),
les composants de la pièce d'horlogerie et/ou du mouvement horloger et/ou de l'élément inertiel et/ou de l'oscillateur et/ou du système réglant étant agencés et/ou configurés de sorte que la pièce d'horlogerie présente une valeur d'intensité de champ magnétique d'arrêt supérieure ou égale à 20'000 G ou supérieure ou égale à 35'000 G.

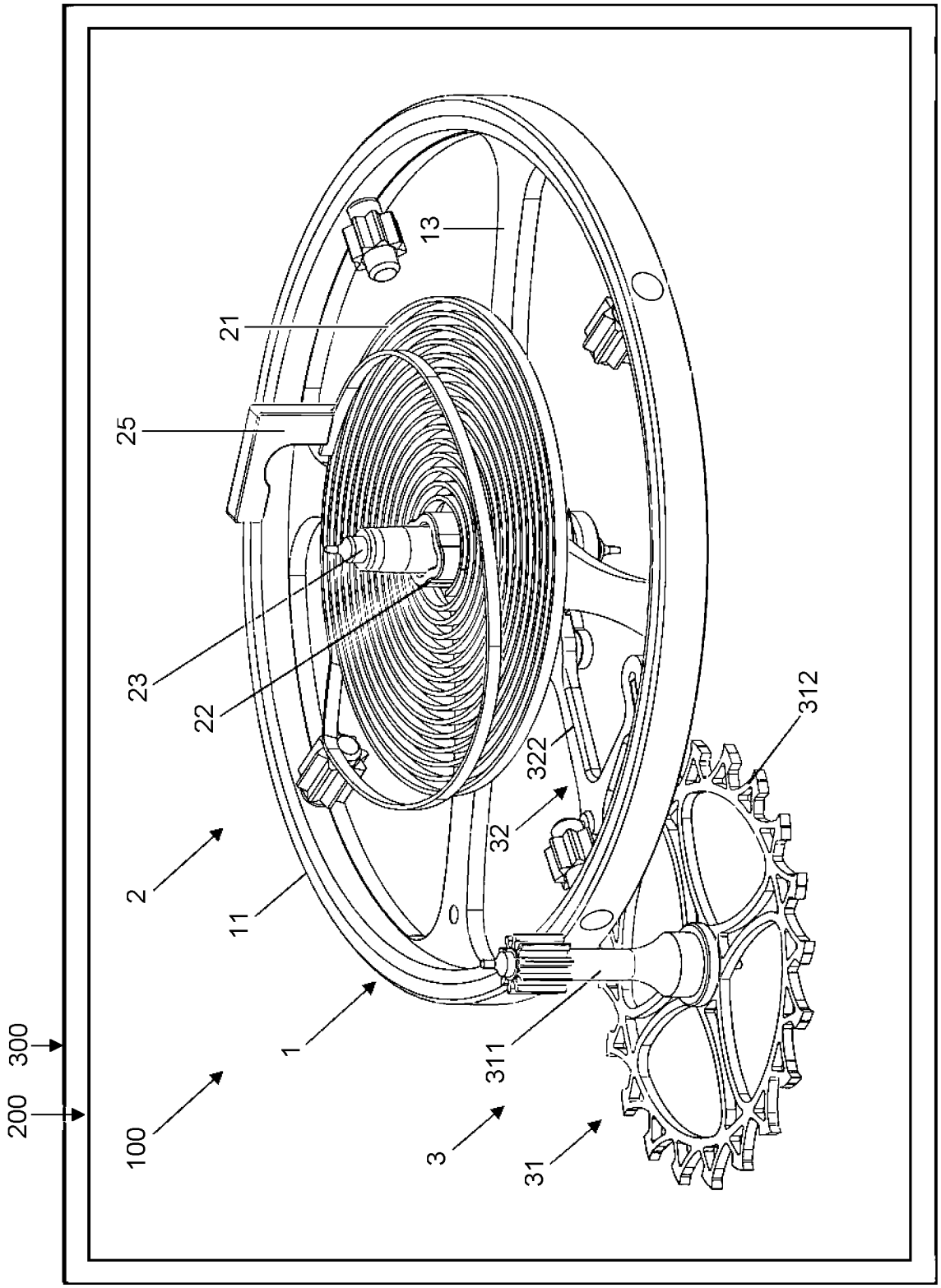


Figure 1

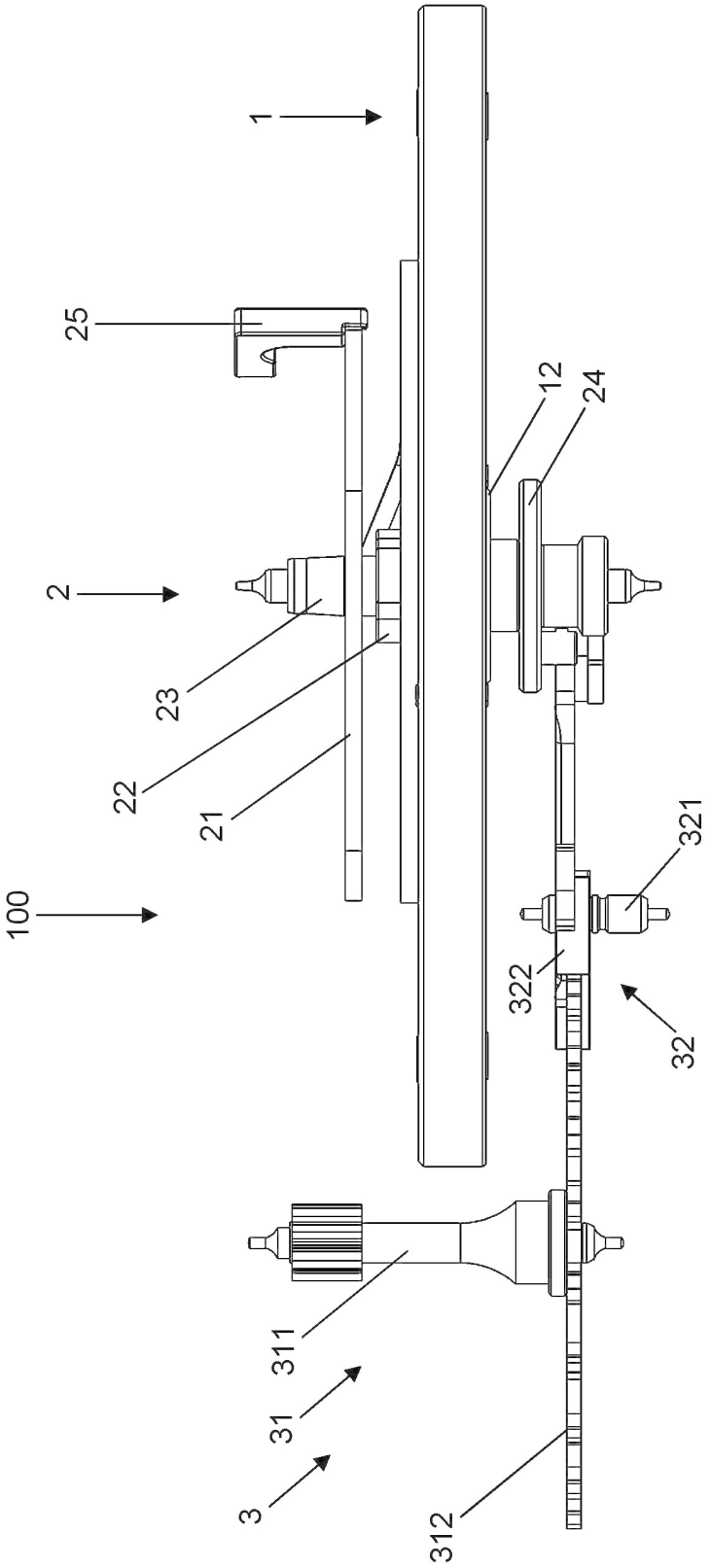


Figure 2