



CONFÉDÉRATION SUISSE
INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) **CH 716 518 A2**

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

(51) Int. Cl.: **G04B 15/14** (2006.01)
F16H 55/06 (2006.01)
G04B 17/04 (2006.01)
G04D 3/00 (2006.01)

(12) **DEMANDE DE BREVET**

(21) Numéro de la demande: 01051/19

(71) Requéant:
ETA SA Manufacture Horlogère Suisse,
Schild-Rust-Strasse 17
2540 Grenchen (CH)

(22) Date de dépôt: 22.08.2019

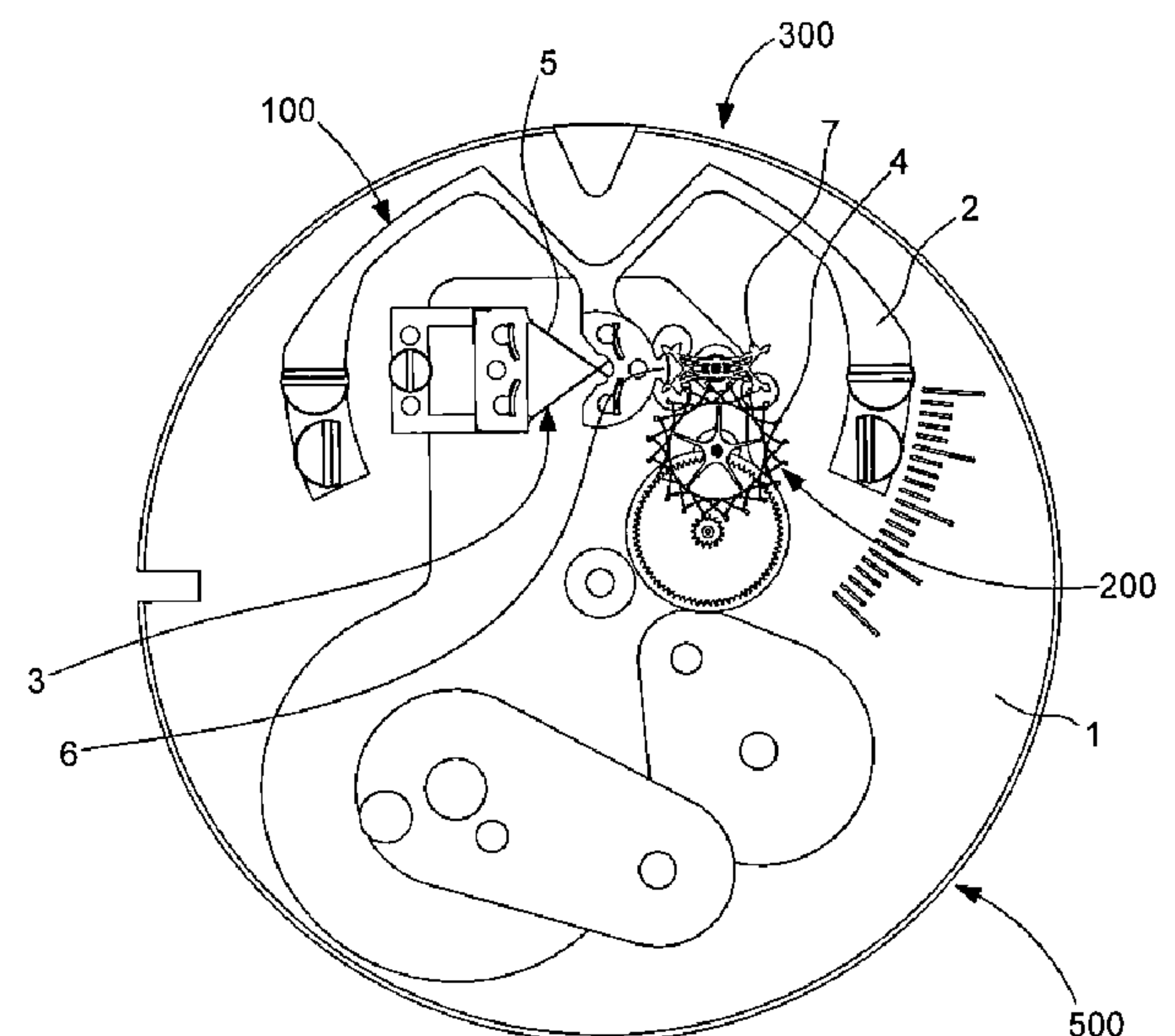
(72) Inventeur(s):
Sylvain Huot-Marchand, 2743 Eschert (CH)

(43) Demande publiée: 26.02.2021

(74) Mandataire:
ICB Ingénieurs Conseils en Brevets SA,
Faubourg de l'Hôpital 3
2001 Neuchâtel (CH)

(54) **Mécanisme régulateur d'horlogerie.**

(57) L'invention concerne un mécanisme régulateur (300) d'horlogerie, comportant un mécanisme résonateur (100) à pivot virtuel et à guidage flexible, de facteur de qualité supérieur à 1000, dont l'élément inertiel (2) coopère indirectement avec un mécanisme d'échappement (200) libre dans le cycle de fonctionnement duquel le mécanisme résonateur (100) possède au moins une phase de liberté où il est sans contact avec le mécanisme d'échappement (200), ce mécanisme régulateur (300) comporte un couple de composants comportant des surfaces de frottement agencées pour coopérer en contact l'une avec l'autre, où la première surface de frottement est constituée par la surface d'un élément comportant du carbure de silicium.



Description

Domaine de l'invention

[0001] L'invention concerne un mécanisme régulateur d'horlogerie, comportant, agencés sur une platine, un mécanisme résonateur d'un facteur de qualité Q, et un mécanisme d'échappement lequel est soumis à un couple de moyens moteurs que comporte un mouvement, ledit mécanisme résonateur comportant un élément inertiel agencé pour osciller par rapport à ladite platine, ledit élément inertiel étant soumis à l'action de moyens de rappel élastique fixés directement ou indirectement à ladite platine, et ledit élément inertiel étant agencé pour coopérer indirectement avec un mobile d'échappement que comporte ledit mécanisme d'échappement, ledit mécanisme régulateur comportant au moins un couple de composants comportant un premier composant et un deuxième composant comportant respectivement une première surface de frottement et une deuxième surface de frottement qui sont agencées pour coopérer en contact l'une avec l'autre.

[0002] L'invention concerne encore un mouvement d'horlogerie comportant un tel mécanisme régulateur.

[0003] L'invention concerne encore une montre comportant un tel mouvement et/ou un tel mécanisme régulateur.

[0004] L'invention concerne encore un procédé de réalisation d'un tel mécanisme d'échappement.

[0005] L'invention concerne le domaine des mécanismes horlogers comportant des composants en permanence en mouvement, et plus particulièrement le domaine des mécanismes d'échappement.

Arrière-plan de l'invention

[0006] Les constructeurs horlogers se sont toujours efforcés d'accroître la fiabilité des mouvements, grâce à la réduction de la fréquence des entretiens, tout en assurant la marche précise des mouvements horlogers.

[0007] La lubrification des mobiles et composants en mouvement est un problème difficile à résoudre. De longues expérimentations tribologiques sont nécessaires pour mettre au point des solutions permettant de simplifier ou même de supprimer la lubrification.

[0008] Plus particulièrement, on recherche un fonctionnement sans lubrification des mécanismes d'échappement, en tentant de définir des couples de matériaux en frottement présentant un coefficient de frottement bas et stable ainsi qu'une faible usure, et présentant une excellente tenue dans la durée.

[0009] Beaucoup de montres mécaniques actuelles sont munies d'un résonateur à balancier-spiral, qui constitue la base de temps du mouvement, et associé à un mécanisme d'échappement en général à ancre suisse. Cet échappement, remplit deux fonctions principales:

- l'entretien des va-et-vient d'au moins une masse inertielle, typiquement un balancier, que comporte le résonateur ;
- et le comptage de ces va-et-vient.

[0010] En plus de ces deux fonctions principales, l'échappement doit être robuste, résister aux chocs, et éviter de coincer le mouvement (renversement). Le mécanisme d'échappement à ancre suisse a un rendement énergétique faible (environ 30%). Ce faible rendement provient du fait que les mouvements de l'échappement sont saccadés, qu'il y a des chutes ou chemins perdus pour s'accommoder des erreurs d'usinage, et, aussi du fait que plusieurs composants se transmettent leur mouvement via des plans inclinés qui frottent les uns par rapport aux autres.

[0011] Pour constituer un résonateur mécanique, il faut au moins un élément inertiel, un moyen de guidage et un moyen de rappel élastique. Traditionnellement, un ressort spiral joue le rôle d'élément de rappel élastique pour l'élément inertiel que constitue un balancier.

[0012] Quand la masse inertielle est guidée en rotation par des pivots qui tournent dans des paliers lisses en rubis, cela donne lieu à des frottements, et donc à des pertes d'énergie et des perturbations de marche, qui dépendent des positions de la montre dans l'espace par rapport au champ de gravité, et que l'on cherche à supprimer.

[0013] Une nouvelle génération de résonateurs mécaniques comporte, en liaison avec l'élément inertiel, au moins deux éléments flexibles qui assurent les deux fonctions de guidage en pivotement et de moyen de rappel élastique. Ces nouveaux résonateurs permettent des fréquences d'oscillation plus importantes, de l'ordre de 10 Hz, voire 50 Hz ou plus, et des facteurs de qualité bien plus élevés, souvent supérieurs à 1000, et notamment de l'ordre de 2000, que ceux des résonateurs mécaniques traditionnels avec balancier et spiral, généralement de l'ordre de 280. L'énergie à fournir au résonateur à chaque alternance est donc bien plus faible, par exemple 20 fois plus faible.

[0014] L'énergie transitant par l'échappement est donc relativement bien plus faible. Cela impose une conception des composants d'échappement avec des inerties réduites. Cette caractéristique est atteinte, d'une part en utilisant des matériaux de densité faible comme par exemple le silicium, ou similaire, et d'autre part en réduisant la taille des composants de l'échappement. Le silicium (ou un de ses oxydes, ou encore tout autre matériau micro-usinable désormais usuel en horlogerie) peut avantageusement être usiné avec une des technologies issues de l'électronique comme le „Deep Reactive Ion Etching“ (DRIE) qui permettent une précision adaptée aux contraintes de fonctionnement d'un tel échappement. Le silicium s'oxyde naturellement à l'air mais il peut être oxydé durant le processus de fabrication pour, par exemple, accroître la ténacité des composants ou en modifier le coefficient thermoélastique. La croissance contrôlée du dioxyde de silicium

SiO₂ permet, en particulier, de créer des précontraintes dans des lames minces, et de créer des composants bistables ou multistables.

[0015] L'oxyde de silicium (silice) est connu pour sa propension à adsorber de l'eau. Ce caractère hygroscopique est d'ailleurs utilisé pour assécher l'air de certains conditionnements pour éviter que la marchandise y transportée ne soit altérée par l'humidité (par exemple sous forme de sachets de silica-gel).

[0016] Dans le cas de mécanismes transmettant des énergies très faibles, comme le sont ces nouveaux résonateurs, des phénomènes d'adhésion peuvent se produire. Ces phénomènes de surface peuvent devenir prépondérants si la taille des composants de l'échappement est faible. Ces effets de surface (frottement et adhésion) deviennent en effet plus importants que les effets de volume (inertie, masse) au fur et à mesure que la dimension des pièces diminue. Il en résulte in fine des collements potentiellement néfastes. Les essais réalisés ont en effet montré une perte significative de rendement lorsque l'humidité relative augmente. Les forces d'adhésion dépendent des différentes tensions de surface et du volume de liquide, et non de la force appliquée par un composant sur un autre. L'influence de ces collements peut conduire à des arrêts du mouvement lorsque le couple à l'échappement est faible et que l'humidité est élevée, ce qui risque d'entraîner des pertes de réserve de marche. En l'absence de précaution particulière quant aux surface de contact, on peut constater, quand une montre fonctionne dans une atmosphère avec une humidité supérieure à 80%, des phénomènes de chute brutale d'amplitude de l'oscillateur, voire son arrêt, et ceci d'autant plus que l'énergie à l'échappement est faible ; ces phénomènes peuvent déjà se produire avec une humidité plus réduite, de l'ordre de 50%. Notons qu'avec une humidité faible, de l'ordre de 20%, on ne constate en principe pas de perte d'amplitude ni d'arrêt.

[0017] On constate en effet, que l'énergie échangée entre un tel nouveau résonateur et l'échappement est très faible, et n'est que peu supérieure à l'énergie nécessaire pour décoller des surfaces en contact et rompre un ménisque de lubrifiant. Par exemple l'énergie échangée entre le mécanisme résonateur et l'échappement est de l'ordre de trois fois à dix fois l'énergie de rupture de contact. Cette circonstance rend naturellement l'auto-démarrage difficile après un arrêt inopiné, par exemple suite à un choc.

[0018] Une alternative pour remédier à ce problème consiste à déposer un revêtement hydrophobe en surface des composants en matériau micro-usinable (notamment en silicium ou/et oxyde de silicium). Mais, du fait des contraintes de fonctionnement de l'échappement, ce revêtement doit être résistant à l'abrasion de manière à garantir le fonctionnement à long terme. Les monocouches autoassemblées ou les lubrifiants filmogènes greffables en surface peuvent être insuffisamment résistants, et révéler à l'usure la surface en matériau micro-usinable, notamment silicium et oxyde de silicium, rendant de nouveau le mécanisme sensible à l'humidité.

[0019] Un dépôt d'épilame présente l'inconvénient d'un vieillissement dans le temps, c'est pourquoi il est important de rechercher des matériaux avec la moindre usure possible, pour les surfaces de contact des composants en frottement tels que cheville de plateau, dard, fourchette avec cornes, palette d'ancre, dent de roue d'échappement, étoqueau, et similaires.

[0020] Le document XP002734688, „A study of static friction between silicon and silicon compounds“, de MM. Deng et Ko, décrit l'utilisation en micro-mécanique de précision du couple nitrure de silicium - silicium, pour une faible usure dans la durée, et une tribologie améliorée.

[0021] Le document XP002734924, „LPCVD against PECVD for micromechanical applications“, de MM. Stoffel, Kovacs, Kronast, Müller, décrit l'utilisation de nitrure de silicium non stoechiométrique, obtenu par PECVD ou LPCVD, pour assurer des propriétés tribologiques.

[0022] Le document WO2009/049591 au nom de Damasko décrit un procédé de fabrication d'éléments fonctionnels mécaniques de mouvements, en particulier d'éléments fonctionnels pour faire osciller les systèmes de mouvements, dont le matériau ou le matériau de départ est choisi dans un groupe comportant une grande variété de composés, dont le nitrure de silicium.

Résumé de l'invention

[0023] L'invention se propose de fournir une solution au problème du collement des composants à contact intermittent dans un mouvement d'horlogerie pour montre, comportant un nouveau résonateur à guidages flexibles et pivot virtuel, de facteur qualité supérieur à 1000, associé à un mécanisme d'échappement.

[0024] L'invention concerne plus particulièrement l'utilisation du carbure de silicium, ou de matériaux dérivés comportant essentiellement du carbure de silicium, comme matériau tribologique à haute performance dans l'échappement.

[0025] A cet effet, l'invention concerne un mouvement d'horlogerie pour montre, comportant un nouveau résonateur à guidages flexibles et pivot virtuel, de facteur qualité supérieur à 1000, et un mécanisme d'échappement, à tribologie améliorée, selon la revendication 1.

[0026] L'invention concerne encore un procédé de réalisation d'un tel mécanisme d'échappement, caractérisé en ce qu'on réalise chaque couple constitué par une première surface de frottement et une deuxième surface de frottement antagonistes, en réalisant un composant en carbure de silicium avec un substrat pour constituer ladite première surface de frottement et/ou la deuxième surface de frottement, ou bien par frittage, ou bien par élaboration massive.

Description sommaire des dessins

[0027] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée qui va suivre, en référence aux dessins annexés, où :

- la figure 1 représente, de façon schématisée et en vue en plan, un mécanisme d'échappement traditionnel comportant notamment une palette d'ancre coopérant en contact avec une roue d'échappement, au niveau de surfaces de contact agencées selon l'invention ;
- la figure 2 représente, de façon schématisée, la coopération entre les surfaces de contact antagonistes ;
- la figure 3 représente, de façon schématisée et en vue en plan, un mécanisme régulateur d'horlogerie, selon l'invention, comportant un mécanisme résonateur à guidages flexibles et pivot virtuel avec un haut facteur de qualité supérieur à 1000, comportant une masse inertielle oscillante porteuse d'une cheville de plateau agencée pour coopérer avec une fourchette d'une ancre laquelle est par ailleurs agencée pour coopérer avec les dents d'une roue d'échappement ;
- la figure 4 est un détail de la figure 3 ;
- la figure 5 représente, sous forme d'un schéma-blocs, une montre comportant un mouvement lequel comporte un tel mécanisme régulateur d'horlogerie, selon l'invention.

Description détaillée des modes de réalisation préférés

[0028] L'invention concerne l'utilisation du carbure de silicium en tant que matériau permettant le fonctionnement à lubrification minimale d'un mécanisme régulateur d'horlogerie comportant un mécanisme résonateur à guidages flexibles et pivot virtuel avec un haut facteur de qualité supérieur à 1000, associé à un mécanisme d'échappement.

[0029] Le fonctionnement sans lubrification est un cas particulier. Mais les caractéristiques exposées ci-après conviennent aussi à un mécanisme régulateur lubrifié, dont l'avantage est de pouvoir atteindre une amplitude supérieure à celle d'un régulateur fonctionnant à sec, avec notamment un gain de 10% à 20% d'amplitude dans certains cas. Le mécanisme régulateur 300 comporte alors de préférence un lubrifiant avec une tension de surface inférieure à 50 mN/m, et plus particulièrement inférieure à 40 mN/m, et plus particulièrement encore inférieure ou égale à 36 mN/m ; la tension de surface du lubrifiant horloger utilisé est alors significativement plus faible que celle de l'eau, laquelle est de 72 mN/m soit entre la moitié et les deux tiers environ. L'invention est plus particulièrement décrite pour un fonctionnement à sec, mais l'homme du métier n'aura aucune difficulté pour l'extrapoler à un mécanisme lubrifié.

[0030] Par commodité de langage, on appellera ci-après „carbure de silicium“ au sens large un matériau qui est composé :

- ou bien par du carbure de silicium stoechiométrique SiC, qui peut être massif dans le cas le plus général, ou encore en couche mince ;
- ou bien selon une composition dite non stoechiométrique $\text{Si}_x\text{C}_y\text{H}_z$, avec x égal à 1, y compris entre 0.8 et 5.0, et z compris entre 0.00 et 0.70, et plus particulièrement entre 0.04 et 0.70, qui est de préférence appliqué en couche mince, mais qui peut aussi être constitutive d'un composant massif.

[0031] On appelle ici „massif“ un composant dont la plus petite dimension est supérieure à 0,10 mm, tandis qu'une „couche mince“ a sa plus petite dimension inférieure à 10 micromètres, et de préférence inférieure à 1 micromètre. Bien sûr, beaucoup de composants horlogers comportent des zones dont la plus faible dimension est inférieure à 0.10 mm, comme des bras ou des dents de roue d'échappement, ou similaire ; les composants horlogers utilisés dans le cas d'espèce des résonateurs à haut facteur de qualité sont généralement issues d'un wafer d'épaisseur supérieure à 0.10 mm, ou d'un assemblage de plusieurs wafers plus minces (wafer bonding) pour réaliser un wafer résultant d'épaisseur supérieure à 0.10 mm.

[0032] En effet l'expérimentation permet d'établir que le frottement du carbure de silicium contre du silicium ou de l'oxyde de silicium présente des propriétés particulièrement souhaitées dans un mécanisme horloger, et tout particulièrement dans le cas d'un mécanisme d'échappement.

[0033] Un tel couple de frottement présente un coefficient de frottement bas, inférieur à 0.17, sur une large plage de force - vitesse (1mN - 200mN et 1 cm/s - 10 cm/s).

[0034] La littérature enseigne que, pour des matériaux durs élastiques, en raison de l'augmentation de la contrainte de cisaillement en fonction de la pression, le coefficient de frottement varie habituellement une loi de type: $\mu = S/P + \alpha$, où : S : contrainte de cisaillement limite, P: pression de Hertz, α : paramètre de valeur constante.

[0035] Le paramètre S détermine la dépendance du couple en fonction de la pression, et est de ce fait particulièrement utile à prendre en compte dans le cas du frottement à sec dans l'échappement où les forces et pressions de contact varient grandement, ainsi que dans l'interface entre l'échappement et le résonateur.

[0036] En comparaison d'autres couples en frottement, les couples carbure de silicium/Si ou carbure de silicium/SiO₂ présentent une faible dépendance du coefficient de frottement en fonction de la force normale appliquée. Cela se traduit par un paramètre S très faible. Ce comportement est particulièrement utile dans l'échappement puisque la force normale varie grandement, typiquement de 0 à 200 mN lors des mises en contact et impacts. Durant les pertes de contact et mises en contact, le carbure de silicium permet de conserver un coefficient de frottement bas inférieur à 0.2, valeur qui est habituellement considérée comme le seuil critique de fonctionnement de l'échappement.

[0037] Lors des décollements (séparation de la dent de la roue d'échappement d'une part, et de la levée de l'ancre d'autre part, par exemple), ce sont les forces d'adhésion qui interviennent. A sec agissent des forces électrostatiques, de van der Waals, Hydrogène, et autres. Dans le cas d'un contact avec médium liquide (ou fluide), ce sont les forces de tension de surface qui s'opposent au décollement et ainsi consomment de l'énergie. Dans l'absolu, on ne peut pas les considérer comme des forces de frottement. Dans le cas des mécanismes régulateurs classiques à balancier-spiral, on tend à les assimiler à des forces de frottement car les forces d'adhésion sont beaucoup plus faibles que celles de frottement, et sont presque négligeables devant elles. Dans le cas d'espèce des régulateurs à haut facteur de qualité, elles sont du même ordre de grandeur, et peuvent même être prépondérantes dans certains cas. Les mécanismes sous-jacents et les stratégies pour diminuer frottement ou adhésion sont différentes, et peuvent même se révéler antagonistes dans certaines configurations.

[0038] De surcroît le carbure de silicium résiste bien à l'usure, ce qui garantit une bonne tenue dans la durée.

[0039] L'expérimentation comparée avec des composants de contact en silicium ou oxyde de silicium montrent que l'emploi du carbure de silicium superficiel permet de réduire à néant les arrêts de l'oscillateur.

[0040] L'invention concerne ainsi un mécanisme régulateur 300 d'horlogerie, comportant, agencés sur une platine 1, un mécanisme résonateur 100 à pivot virtuel et à guidage flexible, d'un facteur de qualité Q supérieur à 1000, et un mécanisme d'échappement 200 lequel est soumis à un couple de moyens moteurs 400 que comporte un mouvement 500, notamment pour l'équipement d'une montre 1000.

[0041] Par exemple, le mécanisme régulateur 300 illustré aux figures 3 et 4 a une puissance à l'échappement de l'ordre de 0.7 microwatt, ce qui est environ vingt fois plus faible que dans le cas d'un régulateur traditionnel.

[0042] Le mécanisme résonateur 100 comporte au moins un élément inertiel 2 agencé pour osciller par rapport à la platine 1. Cet élément inertiel 2 est soumis à l'action de moyens de rappel élastique 3 fixés directement ou indirectement à la platine 1. Et cet élément inertiel 2 est agencé pour coopérer indirectement avec un mobile d'échappement 4 que comporte le mécanisme d'échappement 200.

[0043] Les figures montrent, de façon non limitative, une cheville de plateau 6 solidaire d'une masse inertielle 2, et agencée pour coopérer avec une ancre 7, laquelle est à son tour agencée pour coopérer avec un tel mobile d'échappement 4 ici constitué par une roue d'échappement.

[0044] Ce mécanisme résonateur 100 est ici un résonateur rotatif à pivot virtuel, autour d'un axe principal DP, à guidage flexible comportant au moins deux lames flexibles 5, et comportant une telle cheville de plateau 6 solidaire de l'élément inertiel 2.

[0045] Le mécanisme d'échappement 200 comporte une ancre 7 pivotant autour d'un axe secondaire DS et comportant une fourchette d'ancre 8 agencée pour coopérer avec la cheville de plateau 6. Ce mécanisme d'échappement 200 est un mécanisme d'échappement libre, dans le cycle de fonctionnement duquel le mécanisme résonateur 100 possède au moins une phase de liberté où la cheville de plateau 6 est à distance de la fourchette d'ancre 8.

[0046] Ce mécanisme régulateur 300 est un mécanisme à tribologie améliorée, en fonction des constats exposés plus haut, et est conçu pour minimiser les phénomènes de collement entre les surfaces des composants à contact variable et/ou discontinu.

[0047] Plus particulièrement, ce résonateur 100 a un facteur de qualité supérieur à 1000, plus particulièrement supérieur à 1800, plus particulièrement encore supérieur à 2500.

[0048] La technologie des résonateurs à pivot virtuel, et en particulier à lames flexibles, n'autorise pas encore de grandes amplitudes d'oscillation de la masse inertielle. Dans le cas de l'invention, l'amplitude d'oscillation du résonateur 100 est inférieure à 180°, plus particulièrement inférieure à 90°, plus particulièrement encore inférieure à 40°.

[0049] La fréquence d'oscillation du résonateur 100 est supérieure à 8Hz, plus particulièrement supérieure ou égale à 10 Hz, plus particulièrement encore supérieure ou égale à 15 Hz.

[0050] De façon propre à l'invention, ce mécanisme régulateur 300 comporte, au niveau du mécanisme résonateur 100 et/ou du mécanisme d'échappement 200 et/ou entre le mécanisme résonateur 100 et le mécanisme d'échappement 200, au moins un couple de composants, comportant un premier composant 22 et un deuxième composant 32, lesquels comportent respectivement une première surface de frottement 20 et une deuxième surface de frottement 30 qui sont agencées pour coopérer en contact l'une avec l'autre.

[0051] Par exemple et non limitativement, ce premier composant 22 et ce deuxième composant 32 sont pris parmi : cheville de plateau 6, ancre 7, dard d'ancre, fourchette 8 d'ancre avec ses cornes 26, palette d'ancre 72, 81, 82, dent de roue d'échappement 4, étoqueau 36 fixé à la platine, et similaires.

[0052] Dans une exécution particulière, toutes les paires de composants à contact variable et/ou discontinu d'un tel mécanisme régulateur comportent des surfaces antagonistes selon les caractéristiques de l'invention, dont au moins un composant 22 ou 32 comporte du carbure de silicium ou son équivalent c'est-à-dire un matériau comportant au moins 90% en masse de carbure de silicium SiC et au moins un autre matériau, pris parmi une liste exposée ci-dessous.

[0053] L'invention concerne plus particulièrement le cas des mécanismes résonateurs dans lesquels l'énergie à transmettre lors de chaque impulsion est inférieure à 200 nJ.

[0054] Plus particulièrement, l'invention concerne plus particulièrement le cas des mécanismes résonateurs dans lesquels à la fois l'énergie à transmettre lors de chaque impulsion est inférieure à 200 nJ, et le facteur de qualité est supérieur à 1000.

[0055] La première surface de frottement 20 est la surface d'un composant qui comporte du carbure de silicium qui est, ou bien du carbure de silicium stoechiométrique SiC, ou bien du carbure de silicium non stoechiométrique $\text{Si}_x\text{C}_y\text{H}_z$, avec x égal à 1, y compris entre 0.8 et 5.0, et z compris entre 0.00 et 0.70, ou bien encore un matériau, dit équivalent, c'est-à-dire comportant au moins 90% en masse de carbure de silicium SiC et au moins un autre matériau, pris parmi la liste suivante dont les proportions sont affichées en masse :

alpha-SiC 6H, bêta-SiC 3C, SiC 4H, SiC fluoré, carbonitrure de silicium SiCN, aluminium 400 à 2000 ppm, fer inférieur à 3000 ppm, bore et/ou carbure de bore B_4C et/ou bore polyphénylique et/ou décaborane $\text{B}_{10}\text{H}_{14}$ et/ou du carborane $\text{B}_{10}\text{H}_{12}\text{C}_2$, le total de matériaux contenant du bore étant compris entre 0.04% à 0.14%, carbone inférieur à 8000 ppm, carbure de vanadium, carbure de zirconium, oxynitrure de silicium alpha : alpha-SiAlON dopé yttrium, graphène, autres impuretés sous 500 ppm.

[0056] Toutefois les impuretés sont souvent nuisibles pour les problématiques de contact, et il est préférable de les limiter à la valeur la plus basse possible, surtout en ce qui concerne le fer qui risque de réagir avec l'humidité pour former des oxydes perturbateurs, qu'il vaut mieux limiter sous 400 ppm. Les autres impuretés sont à limiter, de préférence sous 100 ppm. Le bore n'est avantageux que quand il est rendu stable par une liaison avec un autre élément, on évite alors de préférence le bore seul.

[0057] Et la deuxième surface de frottement 30 est la surface d'un composant qui comporte au moins un matériau assurant une bonne coopération avec le carbure de silicium tel que :

- Al_2O_3 , ou CBN, ou TiO_2 , ou verre, ou quartz, ou diamant, ou DLC ;

- ou bien un matériau à base de silicium pris parmi un groupe comportant le silicium Si, le silicium désoxydé, le dioxyde de silicium SiO_2 , le silicium amorphe a-Si, le silicium polycristallin p-Si, le silicium poreux, ou un mélange de silicium et d'oxyde de silicium, le nitrure de silicium stoechiométrique Si_3N_4 , le nitrure de silicium dans une composition dite non stoechiométrique $\text{Si}_x\text{N}_y\text{H}_z$ avec x égal à 1 et y compris entre 0.8 et 5.0 et z compris entre 0.00 et 0.70, les oxynitrides $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$;

- ou bien la deuxième surface de frottement 30 est la surface d'un composant qui comporte au moins un matériau à base de silicium pris, comme la première surface de frottement 20, parmi le carbure de silicium qui est, ou bien du carbure de silicium stoechiométrique SiC, ou bien du carbure de silicium non stoechiométrique $\text{Si}_x\text{C}_y\text{H}_z$, avec x égal à 1, y compris entre 0.8 et 5.0, et z compris entre 0.00 et 0.70, ou bien encore un matériau comportant au moins 90% en masse de carbure de silicium SiC et au moins un autre matériau pris parmi la liste suivante dont les proportions sont affichées en masse :

alpha-SiC 6H, bêta-SiC 3C, SiC 4H, SiC fluoré, carbonitrure de silicium SiCN, aluminium 400 à 2000 ppm, fer inférieur à 3000 ppm, bore et/ou carbure de bore B_4C et/ou bore polyphénylique et/ou décaborane $\text{B}_{10}\text{H}_{14}$ et/ou du carborane $\text{B}_{10}\text{H}_{12}\text{C}_2$, le total de matériaux contenant du bore étant compris entre 0.04% à 0.14%, carbone inférieur à 8000 ppm, carbure de vanadium, carbure de zirconium, oxynitrure de silicium alpha : alpha-SiAlON dopé yttrium, graphène, autres impuretés sous 500 ppm.

[0058] On entend ici par „silicium amorphe a-Si“ du silicium déposé par procédé PECVD en couche mince, de 50 nm à 10 micromètres, de structure amorphe ; il peut également être hydrogéné ou dopé type N ou type P.

[0059] On entend ici par „silicium polycristallin p-Si“ du silicium déposé par procédé LPCVD, composé de grains de silicium microcristallin, la taille des grains étant de 10 à 2000 nm ; il peut également être dopé type N ou type P. Le module d'élasticité E est voisin de 160 GPa.

[0060] On entend ici par „silicium poreux“ un matériau avec une taille de pores de 2 nm à 10 micromètres, réalisé selon un procédé de fabrication complexe basé sur une anodisation (électrolyte HF et courant électrique).

[0061] Plus particulièrement, une au moins de ces première ou deuxième surface de frottement 20, 30, est constituée, ou bien par la surface d'un élément massif en carbure de silicium massif, de préférence mais non limitativement dans la formulation stoechiométrique SiC, ou bien par la surface d'une couche mince 21, 31, de carbure de silicium dans la formulation stoechiométrique SiC, ou selon une composition non stoechiométrique $\text{Si}_x\text{C}_y\text{H}_z$, avec x égal à 1, y compris entre 0.8 et 5.0, et z compris entre 0.00 et 0.70. Plus particulièrement, z est compris entre 0.04 et 0.70.

[0062] De la même façon que pour le premier composant 22 avec sa première surface de frottement comportant du carbure de silicium, la deuxième surface de frottement 30 peut être, ou bien la surface d'un composant massif, ou bien la surface d'une couche mince.

[0063] Une application particulièrement intéressante et voisine de l'invention est la coopération de levées en SiC, en contact avec des roues Si + SiO₂.

[0064] Une autre application avantageuse concerne l'application dite „carbure de silicium massif“, avec des roues en SiC, par exemple découpées ou laser, ou similaire, qui sont en frottement contre une ancre monobloc en Si + SiO₂, ou contre une ancre classique équipée de levées en Si + SiO₂

[0065] Les combinaisons utilisables en horlogerie sont notamment :

- roue en SiO₂, sous toutes ses formes, quartz massif SiO₂, Si + SiO₂, coopérant avec des palettes en carbure de silicium, sous toutes ses formes, en couches minces, ou carbure de silicium massif ;
- roues carbure, sous toutes ses formes, Si + carbure de silicium, carbure de silicium massif, coopérant avec des palettes en SiO₂, sous toutes ses formes, Si + SiO₂, SiO₂ massif notamment ;
- les palettes peuvent être d'une seule pièce avec l'ancre.

[0066] Une application avantageuse concerne une roue en Si oxydé, et des palettes en SiC massif, ou encore des palettes en Si oxydé recouvertes de carbure de silicium.

[0067] Dans une mise en oeuvre avantageuse de l'invention, la surface de frottement 20, 30, qui est la surface d'un composant qui comporte du carbure de silicium, est la surface d'un composant qui comporte du carbure de silicium SiC, ou encore est constitué de carbure de silicium SiC.

[0068] De façon particulière, la première surface de frottement 20 et la deuxième surface de frottement 30 sont les surfaces de composants 22 et 32 qui comportent chacun du carbure de silicium ou son équivalent tel que défini plus haut. Plus particulièrement encore, la première surface de frottement 20 et la deuxième surface de frottement 30 sont les surfaces de composants qui comportent chacun du carbure de silicium SiC, ou encore est constitué de carbure de silicium SiC.

[0069] Dans une variante particulière, la surface de frottement 20, 30, qui est la surface d'un composant qui comporte du carbure de silicium est une surface d'une couche de carbure de silicium d'épaisseur inférieure à 2 micromètres. Plus particulièrement, les surfaces de frottement 20, 30, sont chacune la surface d'une couche de carbure de silicium d'épaisseur inférieure à 2 micromètres.

[0070] Le phénomène d'adhésion concerne la surface du matériau, et à la limite seulement au niveau de la couche atomique ; toutefois les phénomènes d'abrasion inévitables rendent nécessaire l'existence d'une couche sacrificielle, aussi avantageusement la surface de frottement 20, 30, qui est la surface d'un composant qui comporte du carbure de silicium est une surface d'une couche de carbure de silicium d'épaisseur supérieure à 0.5 micromètres. Plus particulièrement, les surfaces de frottement 20, 30, sont chacune la surface d'une couche de carbure de silicium d'épaisseur supérieure à 0.5 micromètres.

[0071] De préférence, l'épaisseur d'une telle couche de carbure de silicium est comprise entre 50 et 2000 nm. Plus particulièrement, cette couche, dite mince, de carbure de silicium est d'épaisseur comprise entre 50 nanomètres et 500 nanomètres.

[0072] Dans une variante particulière de l'invention, la surface de frottement 20, 30, qui est la surface d'un composant qui comporte du carbure de silicium est la surface d'une couche de carbure de silicium, laquelle couche recouvre un substrat constitué de quartz ou de silicium ou d'un oxyde de silicium, ou d'un mélange de silicium et d'oxyde de silicium. Plus particulièrement, les surfaces de frottement 20, 30, sont chacune la surface d'une couche de carbure de silicium, laquelle couche recouvre un substrat constitué de quartz ou de silicium ou d'un oxyde de silicium, ou d'un mélange de silicium et d'oxyde de silicium.

[0073] Dans une variante particulière, la surface de frottement 30, 20, antagoniste à celle 20, 30, qui est la surface d'un composant qui comporte du carbure de silicium, est la surface d'un composant qui comporte au moins un matériau à base de silicium pris parmi un groupe comportant le silicium Si, le dioxyde de silicium SiO₂, le silicium amorphe a-Si, le silicium polycristallin p-Si, le silicium poreux, et est une surface d'une couche constituée exclusivement d'un ou plusieurs matériaux à base de silicium pris parmi ledit groupe. Plus particulièrement, les surfaces de frottement 20, 30, sont chacune la surface d'un composant qui comporte au moins un matériau à base de silicium pris parmi un groupe comportant le silicium Si, le dioxyde de silicium SiO₂, le silicium amorphe a-Si, le silicium polycristallin p-Si, le silicium poreux, et est une surface d'une couche constituée exclusivement d'un ou plusieurs matériaux à base de silicium pris parmi ledit groupe.

[0074] Le couple SiC/Si donne des résultats particulièrement intéressants, le couple de frottement est sensiblement constant, et ceci sans nécessiter la moindre lubrification. Toutefois il subsiste des pertes par frottement, et le choix d'une lubrification à l'huile fluide peut permettre de réduire ces pertes par frottement, les phénomènes de collement inhérents à la présence d'huile pouvant être contrecarrés par une tension de surface relativement faible.

[0075] De façon avantageuse, la surface de frottement 20, 30, qui est la surface d'un composant qui comporte du carbure de silicium, a une rugosité supérieure ou égale à 5 nanomètres Ra, et plus particulièrement supérieure ou égale à

9 nanomètres Ra, plus particulièrement encore supérieure ou égale à 25 nanomètres Ra, au moins au niveau d'au moins une surface de contact. Plus particulièrement cette surface de frottement 20, 30, a une rugosité supérieure ou égale à 5 nanomètres Ra au niveau de chaque surface de contact. Plus particulièrement encore, ces surfaces de frottement 20, 30, ont chacune une rugosité supérieure ou égale à 5 nanomètres Ra au niveau de chaque surface de contact.

[0076] Dans une variante particulière, une des deux surfaces de frottement 20, 30, est lisse de manière à éviter un frottement trop important (interpénétration des rugosités par exemple). La surface rugueuse doit être en déplacement rotatif avec une surface lisse de manière à éviter l'usure. La rugosité de surface de la contrepièce doit de préférence être faible pour limiter l'usure, et sa rugosité est avantageusement inférieure à celle de la surface de contact, et plus particulièrement mais non limitativement inférieure à 5 nanomètres Ra.

[0077] Dans une autre variante particulière, pour permettre une supra-lubrification, une des surfaces est la surface d'un composant qui comporte un premier relief tramé, en relief, par exemple sous la forme d'une juxtaposition de pyramides, ou similaires, et la surface antagoniste est la surface d'un composant qui comporte un deuxième relief tramé, qui peut être ou non analogue au premier relief tramé, mais qui s'en distingue par une inclinaison relative de sa direction de trame avec celle du premier relief tramé, de façon à prévenir tout encastrement de l'un dans l'autre.

[0078] L'invention concerne encore un procédé de réalisation d'un tel mécanisme d'échappement 200.

[0079] Selon ce procédé :

- dans une première alternative on applique une couche de carbure de silicium sur un substrat pour constituer une de ces première ou deuxième surface de frottement 20, 30 :
- ou bien par un dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma PECVD,
- ou bien par un dépôt chimique en phase vapeur CVD,
- ou bien par un dépôt par pulvérisation cathodique „sputtering“ ;
- ou dans une deuxième alternative on effectue une gravure profonde du composant dans un bulk massif de carbure de silicium.

[0080] Ces variantes ne sont pas exclusives, ce sont les plus économiques. On peut, encore, effectuer une croissance de SiC dans un masque en silicium sacrificiel, mais l'opération est difficile et coûteuse. On peut aussi carburer (ou nitrurer si l'on souhaite obtenir du Si₃N₄ pour une des surfaces antagonistes) un wafer en silicium, mais il est difficile de contrôler la déformation de la maille qui peut aller jusqu'à la dislocation ou à une modification dimensionnelle notable.

[0081] Plus particulièrement, on réalise un composant en carbure de silicium avec un substrat pour constituer la base d'une des première ou deuxième surfaces de frottement 20, 30, ou bien par frittage, ou bien par élaboration massive.

[0082] On peut notamment utiliser, pour le dépôt d'une couche comportant du carbure de silicium, ou constituée de carbure de silicium, une ou plusieurs des technologies connues de l'homme de métier spécialiste des „MEMS“ : LPCVD (dépôt chimique en phase vapeur sous basse pression sous-atmosphérique), PECVD (dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma), CVD (dépôt chimique en phase vapeur à pression atmosphérique), ALD (dépôt de couches minces atomiques), „sputtering“ (pulvérisation cathodique), implantation ionique, et similaires.

[0083] De préférence, on choisit le rapport Si/C compris entre 0.8 à 1.2. Plus particulièrement, la valeur Si/C de 1 est stoechiométrique

[0084] De préférence, quand il s'agit de Si_xC_yH_z, on choisit une concentration en hydrogène comprise entre 2 à 30% de H.

[0085] De préférence, on choisit, de façon non limitative, un substrat habituel en Si.

[0086] En ce qui concerne la sous-couche, on peut choisir, de manière non limitative du SiO₂, typiquement dans une épaisseur comprise entre 50 et 2000 nm, ou du poly-Si, SiC, ou similaire.

[0087] Les limitations technologiques liées à la déposition du carbure de silicium sont connues de l'homme de métier dans le domaine des MEMS.

[0088] Ainsi, l'épaisseur d'une couche de carbure de silicium est de préférence comprise entre 50 et 2000nm.

[0089] En ce qui concerne l'état de compression du carbure de silicium, il est connu de l'homme de métier spécialiste des „MEMS“ que l'accroissement de la concentration du Si réduit les tensions dans le carbure de silicium et peut même le rendre compressif. Il est connu que les matériaux présentant un stress compressif favorisent généralement une réduction de l'usure en frottement. Cela correspond à du carbure de silicium riche en Si. Il convient toutefois d'éviter que trop de silicium en surface ne s'oxyde sous forme d'oxyde de silicium, car alors on retombe dans un phénomène d'adhésion que l'on veut précisément combattre.

[0090] Pour une bonne mise en oeuvre de l'invention, il importe que la couche de carbure de silicium adhère bien au substrat, et que les modules d'élasticité des matériaux ne soient pas trop éloignés. La nature des matériaux sous-jacents

est de moindre importance. Si la couche de carbure de silicium dépasse une épaisseur voisine de 200nm, pour éviter que l'usure fasse apparaître trop vite le silicium, rapidement oxydé en oxyde de silicium néfaste pour l'adhésion, le frottement est déterminé par les tous premiers nanomètres périphériques de cette couche de carbure de silicium.

[0091] Des palettes en SiC monobloc peuvent être réalisées par les mêmes techniques que celles utilisées pour la fabrication des levées en rubis polycristallin, connues de l'homme du métier.

[0092] Par ailleurs, on peut avantageusement considérer du carbure de silicium massif en frottement contre du Si ou SiO₂, par exemple pour une palette en carbure de silicium contre une roue en SiO₂.

[0093] L'invention présente de nombreux avantages dans le cas de la nonlubrification de l'échappement :

- une faible dépendance du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de frottement. Particulièrement utile dans le cas de l'échappement puisque la vitesse varie typiquement entre 0 et 3 cm/s.
- un coefficient de frottement stable en fonction de la vitesse et pression réduit le risque d'apparition d'effet stick-slip se traduisant généralement par une dégradation accélérée des matériaux en frottement.
- l'absence de risque de formation d'un troisième corps défavorable au frottement.
- une faible réactivité chimique du carbure de silicium, particulièrement dans sa forme stoechiométrique SiC, le rendant peu sensible aux nettoyages, à la dégradation, à l'interaction avec le milieu ambiant.
- une faible usure.

[0094] On notera que la solution proposée par l'invention est dédiée à la diminution des phénomènes d'adhésion (séparation/déplacement normal et déplacement tangentiel) qui sont différents des phénomènes de frottement (déplacement tangentiel uniquement).

Le carbure de silicium présente également l'avantage d'une mise en oeuvre facile, particulièrement par revêtement conforme PECVD, notamment sur du silicium ou de l'oxyde de silicium. Ce procédé de dépose est largement connu et répandu dans l'industrie du silicium.

[0095] La présente invention permet une utilisation du carbure de silicium sous différentes formes : dépôt PECVD, CVD, „sputtering“, massif, fritté, et autres.

[0096] Des applications voisines de l'invention incluent un frottement du carbure de silicium contre des partenaires non limitatifs tels que : Si, SiO₂, le silicium amorphe a-Si, le silicium polycristallin p-Si, le silicium poreux.

[0097] L'invention permet de résoudre le problème de collement qui entravait jusqu'ici le développement et l'industrialisation des mécanismes régulateurs pour montres à facteur de qualité supérieur à 1000, et on comprend que d'autres problématiques horlogères peuvent également trouver une amélioration. Par exemple, le contact entre la cheville et la fourchette de l'ancre dans un mécanisme traditionnel est également sujet à collements. Plus généralement, cette solution est applicable dans tous les cas où les énergies en jeu sont faibles.

Revendications

1. Mécanisme régulateur (300) d'horlogerie, comportant, agencés sur une platine (1), un mécanisme résonateur (100) à pivot virtuel, autour d'un axe principal (DP), et à guidage flexible, d'un facteur de qualité Q supérieur à 1000, et un mécanisme d'échappement (200) lequel est soumis à un couple de moyens moteurs (400) que comporte un mouvement (500), ledit mécanisme résonateur (100) comportant un élément inertiel (2) agencé pour osciller par rapport à ladite platine (1), ledit élément inertiel (2) étant soumis à l'action de moyens de rappel élastique (3) fixés directement ou indirectement à ladite platine (1), et ledit élément inertiel (2) étant agencé pour coopérer indirectement avec un mobile d'échappement (4) que comporte ledit mécanisme d'échappement (200), caractérisé en ce que ledit élément inertiel (2) est agencé pour coopérer indirectement avec ledit mécanisme d'échappement (200) libre dans le cycle de fonctionnement duquel le mécanisme résonateur (100) possède au moins une phase de liberté où il est sans contact avec ledit mécanisme d'échappement (200), ledit mécanisme régulateur (300) comportant au moins un couple de composants comportant un premier composant (22) et un deuxième composant (32) comportant respectivement une première surface de frottement (20) et une deuxième surface de frottement (30) agencées pour coopérer en contact l'une avec l'autre, caractérisé en ce que un ledit premier composant (22) comporte, au niveau de sa dite première surface de frottement (20), du carbure de silicium qui est, ou bien du carbure de silicium stoechiométrique SiC, ou bien du carbure de silicium non stoechiométrique Si_xC_yH_z, avec x égal à 1, y compris entre 0.8 et 5.0, et z compris entre 0.00 et 0.70, ou bien encore un matériau comportant au moins 90% en masse de carbure de silicium SiC et au moins un autre matériau pris parmi la liste suivante dont les proportions sont affichées en masse : alpha-SiC 6H, bêta-SiC 3C, SiC 4H, SiC fluoré, carbonitrure de silicium SiCN, aluminium 400 à 2000 ppm, fer inférieur à 3000 ppm, bore et/ou carbure de bore B₄C et/ou bore polyphénylique et/ou décaborane B₁₀H₁₄ et/ou du carborane B₁₀H₁₂C₂, le total de matériaux contenant du bore étant compris entre 0.04% à 0.14%, carbone inférieur à 8000 ppm, carbure de vanadium, carbure de zirconium, oxynitrure de silicium alpha : alpha-SiAlON dopé yttrium, graphène, autres impuretés sous 500 ppm, et encore caractérisé en ce que ledit deuxième composant (32) comporte, au niveau de sa dite deuxième surface de frottement (30), au moins un matériau assurant une bonne coopération avec le carbure de silicium, parmi :
 - Al₂O₃, ou CBN, ou TiO₂, ou verre, ou quartz, ou diamant, ou DLC ;

- ou bien un matériau à base de silicium pris parmi un groupe comportant le silicium Si inférieur à 400 ppm en masse, le silicium désoxydé, le dioxyde de silicium SiO_2 inférieur à 8000 ppm en masse, le silicium amorphe a-Si, le silicium polycristallin pSi, le silicium poreux, ou un mélange de silicium et d'oxyde de silicium, le nitrure de silicium stoechiométrique Si_3N_4 , le nitrure de silicium dans une composition dite non stoechiométrique $\text{Si}_x\text{N}_y\text{H}_z$ avec x égal à 1 et y compris entre 0.8 et 5.0 et z compris entre 0.00 et 0.70, les oxynitrures $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$;

- ou bien la deuxième surface de frottement 30 est la surface d'un composant qui comporte au moins un matériau à base de silicium pris, comme la première surface de frottement 20, parmi le carbure de silicium qui est, ou bien du carbure de silicium stoechiométrique SiC, ou bien du carbure de silicium non stoechiométrique $\text{Si}_x\text{C}_y\text{H}_z$, avec x égal à 1, y compris entre 0.8 et 5.0, et z compris entre 0.00 et 0.70, ou bien encore un matériau comportant au moins 90% en masse de carbure de silicium SiC et au moins un autre matériau pris parmi la liste suivante dont les proportions sont affichées en masse :

alpha-SiC 6H, bêta-SiC 3C, SiC 4H, SiC fluoré, carbonitrure de silicium SiCN, aluminium 400 à 2000 ppm, fer inférieur à 3000 ppm, bore et/ou carbure de bore B_4C et/ou bore polyphénylique et/ou décaborane $\text{B}_{10}\text{H}_{14}$ et/ou du carborane $\text{B}_{10}\text{H}_{12}\text{C}_2$, le total de matériaux contenant du bore étant compris entre 0.04% à 0.14%, carbone inférieur à 8000 ppm, carbure de vanadium, carbure de zirconium, oxynitrure de silicium alpha : alpha-SiAlON dopé yttrium, graphène, autres impuretés sous 500 ppm.

2. Mécanisme régulateur (300) selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit premier composant (22) et ledit deuxième composant (32) comportent chacun du carbure de silicium qui est, ou bien du carbure de silicium stoechiométrique SiC, ou bien du carbure de silicium non stoechiométrique $\text{Si}_x\text{C}_y\text{H}_z$, avec x égal à 1, y compris entre 0.8 et 5.0, et z compris entre 0.00 et 0.70, ou bien encore un matériau comportant au moins 90% en masse de carbure de silicium SiC et au moins un autre matériau pris parmi la liste suivante dont les proportions sont affichées en masse : alpha-SiC 6H, bêta-SiC 3C, SiC 4H, SiC fluoré, carbonitrure de silicium SiCN, aluminium 400 à 2000 ppm, fer inférieur à 3000 ppm, bore et/ou carbure de bore B_4C et/ou bore polyphénylique et/ou décaborane $\text{B}_{10}\text{H}_{14}$ et/ou du carborane $\text{B}_{10}\text{H}_{12}\text{C}_2$, le total de matériaux contenant du bore étant compris entre 0.04% à 0.14%, carbone inférieur à 8000 ppm, carbure de vanadium, carbure de zirconium, oxynitrure de silicium alpha : alpha-SiAlON dopé yttrium, graphène, autres impuretés sous 500 ppm
3. Mécanisme régulateur (300) selon la revendication 2, caractérisé en ce que ledit premier composant (22) et ledit deuxième composant (32) comportent chacun du carbure de silicium.
4. Mécanisme régulateur (300) selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que ladite première surface de frottement (20) est constituée par la surface d'un élément massif qui est en carbure de silicium massif dans la formulation stoechiométrique SiC.
5. Mécanisme régulateur (300) selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que ladite deuxième surface de frottement (30) est constituée par la surface d'un élément massif en carbure de silicium massif.
6. Mécanisme régulateur (300) selon la revendication 5, caractérisé en ce que ladite deuxième surface de frottement (30) est constituée par la surface d'un élément massif en carbure de silicium massif dans la formulation stoechiométrique SiC.
7. Mécanisme régulateur (300) selon l'une des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que ledit mécanisme résonateur (100) est un résonateur rotatif à pivot virtuel, autour d'un axe principal (DP), à guidage flexible comportant au moins deux lames flexibles (5), et comporte une cheville de plateau (6) solidaire dudit élément inertiel (2), en ce que ledit mécanisme d'échappement (200) comporte une ancre (7) pivotant autour d'un axe secondaire (DS) et comportant une fourchette d'ancre (8) agencée pour coopérer avec ladite cheville de plateau (6), et est un mécanisme d'échappement libre dans le cycle de fonctionnement duquel ledit mécanisme résonateur (100) possède au moins une phase de liberté où ladite cheville de plateau (6) est à distance de ladite fourchette d'ancre (8), et en ce que ledit premier composant (22) et ledit deuxième composant (32) sont pris parmi ladite cheville de plateau (6), une ancre (7), un dard de ladite ancre (7), une fourchette (8) de ladite ancre (7) ou l'une de ses cornes (26), une palette (72, 81, 82) de ladite ancre (7), une dent de roue d'échappement (4), un étoile (36) fixé à ladite platine (1)
8. Mécanisme régulateur (300) selon l'une des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que ledit mécanisme régulateur (300) est dépourvu de lubrifiant.
9. Mécanisme régulateur (300) selon l'une des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que ledit mécanisme régulateur (300) comporte un lubrifiant avec une tension de surface inférieure à 50 N/m.
10. Mouvement d'horlogerie (500) comportant au moins un mécanisme régulateur (300) selon l'une des revendications 1 à 9.
11. Montre (1000) comportant au moins un mouvement d'horlogerie (500) selon la revendication 10 et/ou au moins un mécanisme régulateur (300) selon l'une des revendications 1 à 9.
12. Procédé de réalisation d'un mécanisme régulateur (300) selon l'une des revendications 1 à 9, caractérisé en ce qu'on réalise chaque couple constitué par une première surface de frottement (20) et une deuxième surface de frottement (30) antagonistes comportant du carbure de silicium, et caractérisé en ce qu'on réalise un composant en carbure de

silicium avec un substrat pour constituer ladite première surface de frottement (20) et/ou ladite deuxième surface de frottement (30) par frittage.

13. Procédé de réalisation d'un mécanisme régulateur (300) selon l'une des revendications 1 à 9, caractérisé en ce qu'on réalise chaque couple constitué par une première surface de frottement (20) et une deuxième surface de frottement (30) antagonistes comportant du carbure de silicium, et caractérisé en ce qu'on réalise un composant en carbure de silicium avec un substrat pour constituer ladite première surface de frottement (20) et/ou ladite deuxième surface de frottement (30), par élaboration sous forme d'un composant massif dont l'épaisseur est supérieure à 0,10 mm.

Fig. 1

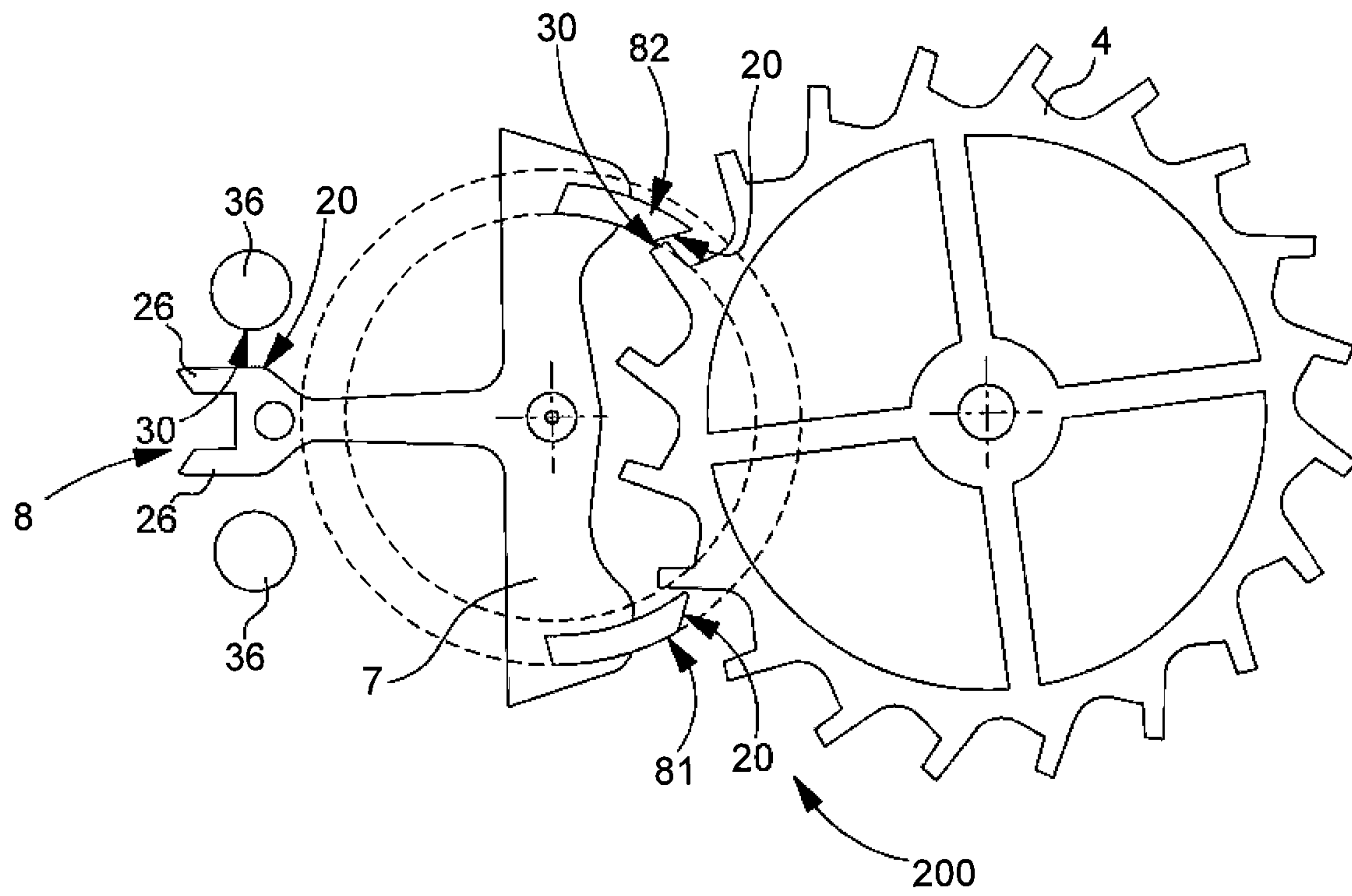


Fig. 2

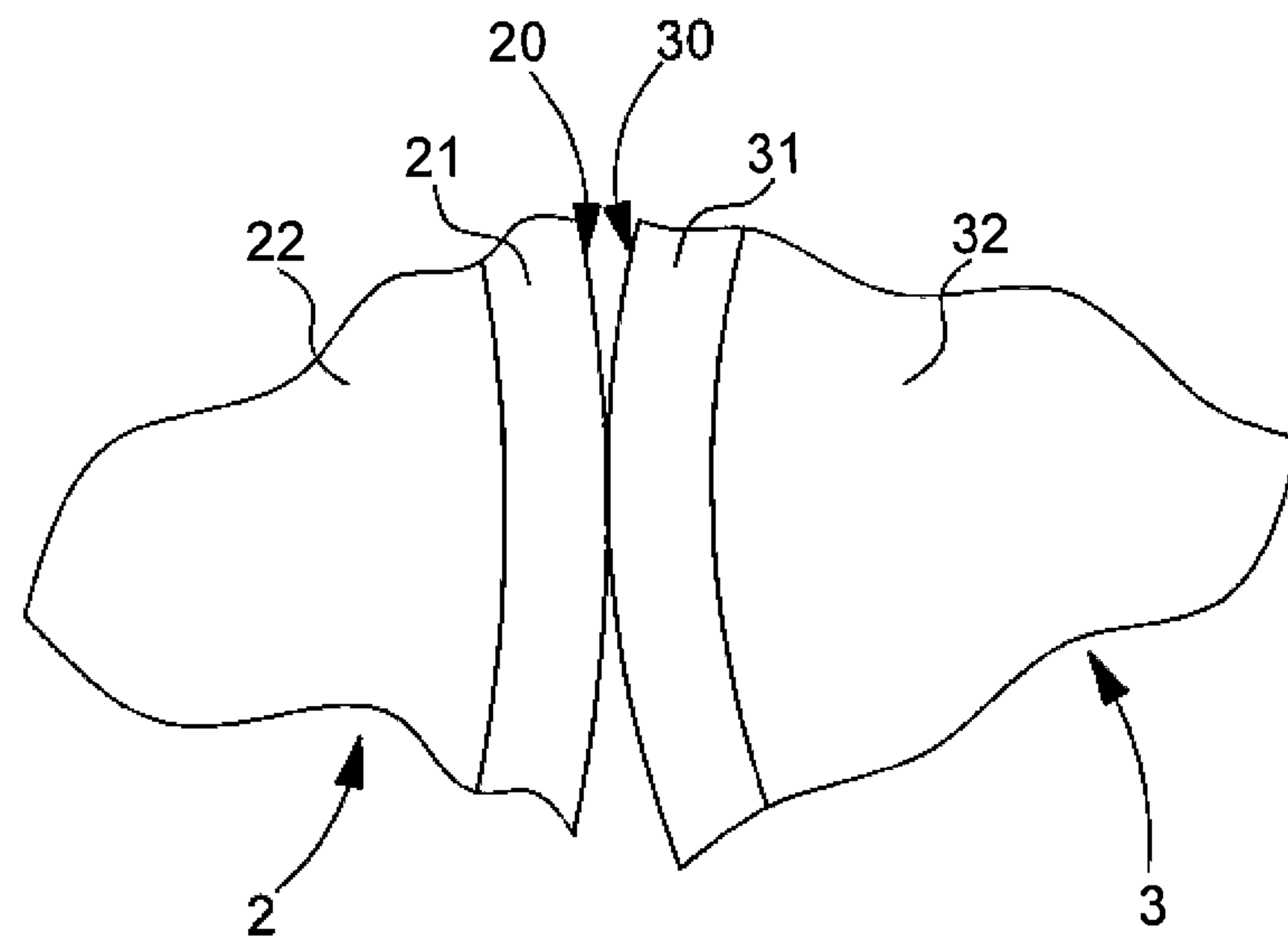


Fig. 3

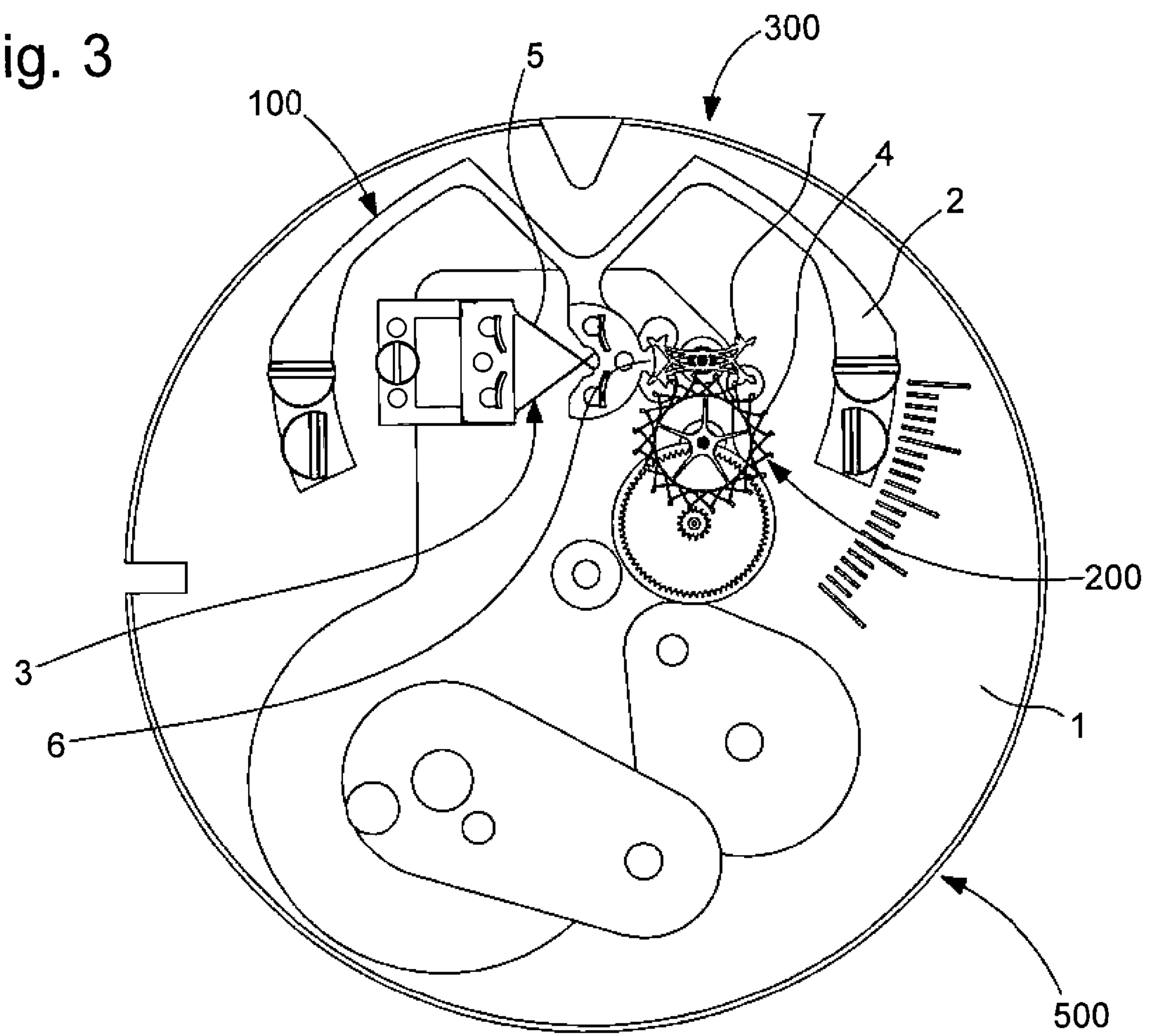


Fig. 4

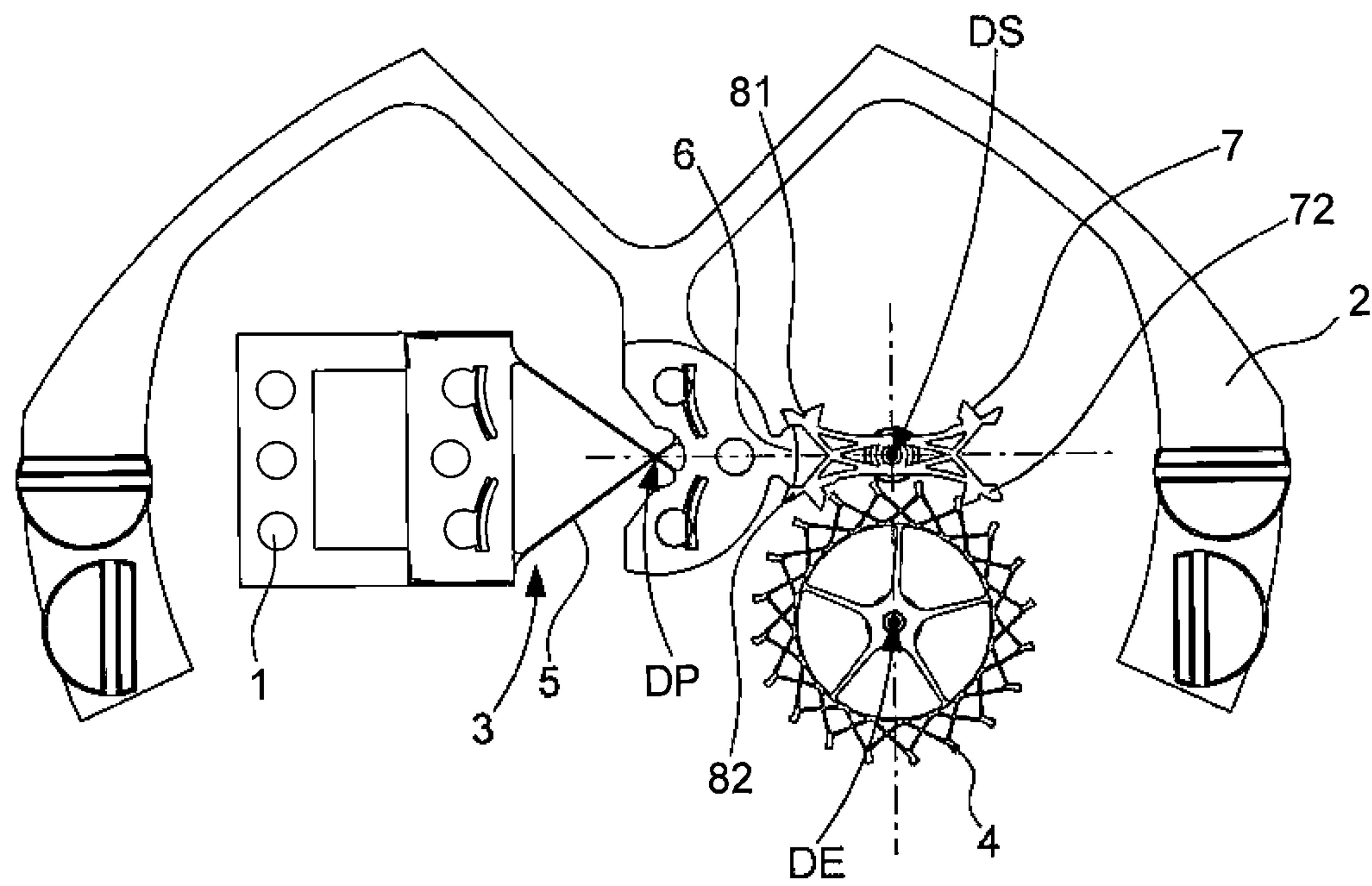


Fig. 5

