

(19)



(11)

EP 3 750 010 B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
19.01.2022 Bulletin 2022/03

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):
G04B 31/08 (2006.01) **G04D 3/00** (2006.01)
G04B 15/14 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **19707492.5**

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):
G04B 15/14; G04B 31/08; G04D 3/0087

(22) Date de dépôt: **04.02.2019**

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/IB2019/050875

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2019/155347 (15.08.2019 Gazette 2019/33)

(54) **PIÈCE DE MICROMÉCANIQUE HORLOGÈRE**

MIKROMECHANISCHES UHRENBAUTEIL

MICROMECHANICAL PART OF TIMEPIECE

(84) Etats contractants désignés:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**

- **FOURNIER, Rémy**
2000 Neuchâtel (CH)
- **JEANNERET, Sylvain**
2013 Colombier (CH)

(30) Priorité: **07.02.2018 EP 18155609**

(74) Mandataire: **Micheli & Cie SA**
Rue de Genève 122
Case Postale 61
1226 Genève-Thônex (CH)

(43) Date de publication de la demande:
16.12.2020 Bulletin 2020/51

(73) Titulaire: **Patek Philippe SA Genève**
1204 Genève (CH)

(56) Documents cités:
EP-A1- 2 484 628 EP-A1- 3 141 520
EP-A1- 3 141 520 CH-A2- 710 846
CH-A2- 710 846

(72) Inventeurs:
• **PERRET, Julien**
74350 Andilly (FR)

EP 3 750 010 B1

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

Description

[0001] La présente invention concerne, par un premier aspect, une pièce de micromécanique horlogère découpée dans un substrat en silicium en forme de plaque et dont les bords découpés comprennent des portions prévues pour servir de surfaces de contact agencées pour glisser contre des zones de contact correspondantes d'une autre pièce de micromécanique dans un pièce d'horlogerie, les bords découpés de la pièce présentant une surface côtelée comprenant une alternance de côtes et de sillons, ces côtes et ces sillons étant rectilignes. Ce premier aspect de l'invention concerne notamment une pièce de micromécanique horlogère qui est conforme à la définition ci-dessus et qui fait partie d'un échappement à ancre.

[0002] Par un second aspect, la présente invention concerne un procédé de fabrication d'une pièce de micromécanique horlogère qui est conforme au premier aspect de l'invention, le procédé comportant les étapes de :

- se munir d'un substrat en silicium en forme de plaque ;
- déposer et structurer un masque de gravure ajouré sur une surface horizontale du substrat ;
- attaquer par gravure ionique réactive la surface du substrat à travers les ajours du masque, de manière à creuser dans le substrat ;
- déposer une couche de passivation chimiquement inerte sur les surfaces exposées par la gravure durant l'étape précédente ;
- répéter l'exécution d'une séquence d'étapes formée par les deux étapes précédentes jusqu'à ce que la séquence ait été effectuée un premier nombre prédéterminé de fois, ou que la gravure ionique réactive ait creusé à travers toute l'épaisseur du substrat ;
- libérer la pièce de micromécanique du masque et du substrat.

ART ANTERIEUR

[0003] Il est connu de réaliser des pièces de micromécanique horlogère, et notamment de telles pièces faisant partie d'un échappement à ancre, par micro-usinage d'une plaquette de silicium mono- ou poly-cristallin. Le document de brevet EP 0 732 635, en particulier, décrit la réalisation d'une ancre d'échappement en silicium. Le micro-usinage du silicium consiste en grande partie en des opérations de gravures. Pour donner aux pièces la forme désirée, on se sert généralement de masques de gravure qu'on a préalablement déposés et structurés sur la surface horizontale du substrat en silicium. La technique de gravage la plus répandue est appelée « gravage ionique réactif profond » (ou alternativement « DRIE », ce qui correspond à son acronyme en anglais). Le brevet US 5,501,893 au nom de Robert Bosch GmbH, en particulier, propose de graver des profils à flancs quasiment verticaux dans un substrat en silicium en appliquant une

procédure faisant alterner les étapes de dépôt d'une couche de passivation inerte et de gravure par plasma. Les étapes de dépôt de la couche de passivation et celles de gravure font toutes appel à des composés fluorés, de sorte qu'elles se déroulent dans un même contexte chimique. Chaque étape dure quelques secondes, la couche de passivation est formée sur toute la surface du substrat, de sorte que ce dernier est protégé contre toute gravure subséquente. Toutefois, durant l'étape de gravure qui suit, le bombardement par des ions qui sont accélérés verticalement désintègre la partie de la couche de passivation qui se trouve au fond des profils (mais pas celle qui recouvre les flancs de ceux-ci). Le fond des profils est ainsi très vite exposé à la gravure réactive. Le brevet US 5,501,893 est incorporé par référence.

[0004] La séquence formée d'une étape de gravure suivie d'une étape de dépôt d'une couche de passivation est répétée un grand nombre de fois. Par exemple, entre 100 et 1000 fois pour graver une rainure qui traverse verticalement de part en part un substrat dont l'épaisseur est de 500 microns. Les flancs produits par la succession alternée d'étapes de dépôt et d'étapes de gravure ne produisent pas des flancs parfaitement droits, mais des flancs finement ondulés qui présentent une alternance de reliefs et de creux régulièrement espacés. L'amplitude de l'ondulation est fonction de la fréquence avec laquelle alternent les étapes de dépôt et de gravure.

[0005] La fabrication de pièces de micromécanique horlogère par micro-usinage d'une plaquette de silicium à l'aide de la technologie DRIE donne de bons résultats. Toutefois, il n'est pas rare que les flancs verticaux d'une pièce de micromécanique soient destinés à servir de surfaces de contact prévues pour glisser contre au moins une zone de contact d'une autre pièce de micromécanique. Il s'avère que ces surfaces de contact verticales ne sont pas entièrement satisfaisantes d'un point de vue tribologique.

[0006] Un certain nombre d'idées ont été avancées pour essayer de remédier à ce problème. Tout d'abord, on a cherché à rendre les flancs des pièces de micromécanique le plus droit possible en raccourcissant la durée des étapes individuelles de gravure. Cette manière de procéder permet d'obtenir des flancs presque parfaitement lisses. Toutefois, cela ne va pas sans une réduction importante de la vitesse d'exécution du procédé de gravure. Une autre solution est décrite dans le document de brevet EP 3 109 200. Ce document propose en effet de réaliser des pièces de micromécanique dont les parois périphériques se subdivisent en deux niveaux. Un niveau supérieur présentant une surface qui est sensiblement verticale et un niveau inférieur dont la surface est orientée obliquement à la manière d'un chanfrein. La paroi périphérique du deuxième niveau étant inclinée relativement à la verticale, elle n'entre pas en contact avec la zone de contact de l'autre pièce de micromécanique. L'aire de contact effective est donc réduite par rapport à une pièce à flancs verticaux. Dans un but d'amélioration de la tribologie entre deux pièces en contact dans leur mouve-

ment respectif, on connaît encore les documents EP3141520A1 et CH710846A2.

BREF EXPOSE DE L'INVENTION

[0007] Un but de la présente invention est de remédier aux inconvénients de l'art antérieur qui viennent d'être expliqués. La présente invention atteint ce but ainsi que d'autres en fournissant une pièce de micromécanique horlogère conforme à la revendication 1 annexée et deux procédés de fabrication conformes respectivement aux revendications 13 et 14 annexées.

[0008] Conformément à l'invention, les côtes et les sillons forment un motif échelonné, avec des premiers intervalles dans lesquels l'espacement séparant les côtes les unes des autres est égal à une première distance, et au moins un deuxième intervalle dans lequel l'espacement entre les côtes est égal à une deuxième distance différente de la première distance. Des essais effectués par la demanderesse ont montré que la présence d'un motif échelonné possédant les caractéristiques ci-dessus améliore la tribologie en diminuant les frottements dans le contact.

[0009] Conformément à certains modes de réalisation de l'invention, les côtes et les sillons sont contenus chacun dans un plan parallèle à la plaque.

[0010] Conformément à d'autres modes de réalisation de l'invention, les côtes et les sillons sont perpendiculaires aux faces principales de la plaque.

[0011] Conformément à un premier mode de réalisation de l'invention, les sillons appartenant aux premiers intervalles ont de préférence tous la même première profondeur. Cette profondeur est comprise entre 10 nm et 2 μm .

[0012] Conformément à un deuxième mode de réalisation de l'invention, la deuxième distance est de préférence plus grande que la première distance.

[0013] Conformément à un troisième mode de réalisation de l'invention, le motif échelonné comprend une pluralité de deuxième intervalles, et la deuxième distance est comprise entre 200 nm et 50 μm , et de préférence comprise entre 800 nm et 10 μm .

[0014] Conformément à une variante avantageuse du troisième mode de réalisation, les sillons appartenant aux deuxième intervalles ont tous la même profondeur. Cette profondeur est comprise entre 10 nm et 10 μm .

[0015] Conformément à une variante avantageuse du deuxième mode de réalisation, le motif échelonné comprend un unique deuxième intervalle comprenant un unique sillon, et la deuxième distance est comprise entre 200 nm et les 2/3 de la hauteur totale de la pièce, et de préférence comprise entre 1/3 et 1/2 de la hauteur totale de la pièce. De plus, la profondeur de l'unique sillon du deuxième intervalle est de préférence comprise entre 10 nm et 50 μm .

BRÈVE DESCRIPTION DES FIGURES

[0016] D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif, et faite en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique en plan représentant un échappement à ancre suisse de l'art antérieur ;
- les figures 2A, 2B 2C sont des vues schématiques en coupe montrant les surfaces côtelées que présentent les bords découpés de trois pièces de micromécanique horlogère qui correspondent respectivement à trois variantes d'un premier mode de réalisation particulier de l'invention ;
- la figure 3 est une vue schématique en coupe montrant la surface côtelée que présente les bords découpés d'une pièce de micromécanique horlogère conforme à un deuxième mode de réalisation particulier de l'invention ;
- la figure 4 est un double graphique montrant l'évolution du flux du gaz réactif et du flux du gaz de passivation durant six étapes consécutives d'une mise en œuvre particulière d'un des deux procédés de l'invention ;
- la figure 5 est une vue schématique en plan d'une dent d'une roue d'échappement qui est conforme à un troisième mode de réalisation de l'invention, les côtes et les sillons formés que présente le plan d'impulsion de la dent étant perpendiculaires au plan principal de la roue d'échappement.

DESCRIPTION DETAILLEE DE MODES DE REALISATION

[0017] L'invention sera décrite ci-après dans le contexte d'un échappement à ancre suisse. On comprendra toutefois que l'invention ne se limite pas à ce domaine d'application restreint, mais qu'elle concerne au contraire tous les dispositifs de micromécanique horlogère dans lesquels deux composants sont amenés à glisser et donc à frotter l'un contre l'autre.

[0018] La figure 1 est une vue schématique en plan représentant un échappement à ancre suisse de l'art antérieur. Le mécanisme représenté comporte notamment une roue d'échappement 3, une ancre 5 et un grand plateau 7 par le centre duquel passe l'axe du balancier 9. Les deux bras de l'ancre se terminent chacun par une palette 11, 13. Les palettes sont agencées pour coopérer avec les dents 15 de la roue d'échappement 3. La roue d'échappement est reliée au barillet (non représenté) par l'intermédiaire d'un rouage (non représenté) qui vient en prise avec le pignon d'échappement (référéncé 17). La roue d'échappement est ainsi sollicitée en permanence vers l'avant (autrement dit, dans le sens horaire tel que représenté à la figure 1). On remarquera qu'à l'instant

représenté, une des dents 15 de la roue d'échappement 3 est immobilisée contre la face de repos de la palette d'entrée 11 de l'ancre 5. Entraînée par le balancier, l'ancre 5 entame un mouvement de pivotement autour de l'axe 19 dans le sens horaire. Le pivotement de l'ancre dans le sens horaire conduit la palette d'entrée à glisser en direction du haut (sur le dessin) contre le flanc avant de la dent 15. Cette phase de dégagement se terminera à l'instant où le plan de repos de la palette aura cessé de faire obstacle à l'avancée du flanc avant de la dent 15. Ensuite, ce sera le sommet aplati de cette même dent (appelé plan d'impulsion de la dent) qui sera amené à glisser contre la face inférieure de la palette 11 (le plan d'impulsion de la palette). Le contact en biais entre les deux plans d'impulsion aura également pour effet de repousser la palette d'entrée 11 vers le haut, de sorte que le mouvement de pivotement de l'ancre 5 dans le sens horaire sera accentué. Cette phase d'impulsion se terminera lorsque la palette d'entrée 11 aura été repoussée suffisamment loin pour offrir un passage complètement dégagé à la dent 15. Les deux phases successives qui viennent d'être décrites durant lesquelles une dent 15 de la roue d'échappement 3 glisse contre les surfaces d'une des palettes 11, 13 de l'ancre 5, sont chacune génératrices de frottements considérables.

[0019] Les figures 2A, 2B et 2C sont des vues schématiques en coupe montrant les surfaces côtelées que présentent les bords découpés de trois pièces de micromécanique horlogère 1, 10 et 20 qui correspondent respectivement à trois variantes d'un premier mode de réalisation particulier de l'invention. En se référant maintenant plus particulièrement à la figure 2A, on peut observer que, conformément à l'invention, les côtes 21 a et les sillons 23a que présentent les bords découpés de la pièce 1 forment un motif échelonné ou étagé, avec des premiers intervalles 25a dans lesquels les côtes sont séparées les unes des autres par des sillons étroits dont la largeur est égale à une première distance, et des deuxièmes intervalles 27a dans lesquels les côtes sont séparées l'une de l'autre par un sillon large dont la largeur est égale à une deuxième distance plus grande que la première distance. On peut observer de plus que, dans le mode de réalisation illustré, les premiers intervalles 25a et les deuxièmes intervalles 27a alternent cycliquement de sorte qu'un deuxième intervalle est toujours intercalé entre deux premiers intervalles et inversement. On comprendra donc que conformément à ce que montre la figure 2A, la surface côtelée du bord découpé de la pièce 1 présente un motif qui se répète de manière périodique sur toute la hauteur de la pièce. Dans la variante représentée, ce motif est formé de deux sillons étroits suivis d'un unique sillon large. On peut encore préciser que, dans cette variante, les sillons étroits peuvent avoir par exemple une largeur de 2 μm et une profondeur comprise entre 10 nm et 2 μm . De plus, les sillons larges peuvent avoir une largeur de 8 μm et une profondeur comprise entre 10 nm et 10 μm .

[0020] Le motif que présente la surface côtelée du bord

découpé de la pièce représentée dans la figure 2B est assez similaire au motif de la figure 2A. On peut observer en effet que les côtes 21b et les sillons 23b que présentent les bords découpés de la pièce 10 forment un motif étagé, ou autrement dit échelonné, avec des premiers intervalles 25b dans lesquels les sillons 23b sont étroits, et des deuxièmes intervalles 27b dans lequel les sillons 23b sont larges. De plus, comme c'était déjà le cas avec l'exemple de la figure 2A, la surface côtelée du bord découpé de la pièce 10 présente un motif qui se répète de manière périodique sur toute la hauteur de la pièce. On peut voir que dans la variante de la figure 2B, ce motif est formé d'un unique sillon étroit suivi d'un sillon large. On peut encore préciser que, dans cette variante, les sillons étroits peuvent avoir par exemple une largeur de 1 μm et une profondeur comprise entre 10 nm et 2 μm . De plus, les sillons larges peuvent avoir une largeur de 9 μm et une profondeur comprise entre 10 nm et 10 μm .

[0021] Le motif que présente la surface côtelée du bord découpé de la pièce représentée dans la figure 2C est assez similaire aux motifs des figures 2A et 2B. On peut observer en effet que la surface côtelée du bord découpé de la pièce 20 présente un motif qui se répète de manière périodique sur toute la hauteur de la pièce. On peut voir que dans la variante de la figure 2C, ce motif est formé de cinq sillons étroits suivi d'un unique sillon large. On peut encore préciser que, dans cette variante, les sillons étroits peuvent avoir par exemple une largeur de 1 μm et une profondeur comprise entre 10 nm et 2 μm . De plus, les sillons larges peuvent avoir une largeur de 9 μm et une profondeur comprise entre 10 nm et 10 μm .

[0022] La figure 3 est une vue schématique en coupe montrant la surface côtelée que présente les bords découpés d'une pièce de micromécanique horlogère 100 conforme à un deuxième mode de réalisation particulier de l'invention. On peut observer dans la figure 3 que les côtes 121 et les sillons 123 que présente le bord découpé de la pièce 100 forment un motif étagé ou échelonné, avec des premiers intervalles 125 dans lesquels l'espacement séparant les côtes 121 les unes des autres est égal à une première distance, et un deuxième intervalle 127 dans lequel l'espacement entre les côtes est égal à une deuxième distance différente de la première distance. Dans le mode de réalisation illustré, l'unique deuxième intervalle 127 est formé lui-même d'un unique sillon 123 dont la largeur est égale à ladite deuxième distance. On peut voir que dans le mode de réalisation illustré, cette deuxième distance est supérieure au quart de l'épaisseur totale de la pièce 100. A titre d'exemple, la pièce 100 pourrait avoir une épaisseur comprise entre 80 μm et 500 μm , et ladite deuxième distance pourrait être comprise entre 20 μm et 150 μm . En se référant toujours à la figure 3, on peut voir encore que, dans le mode de réalisation illustré, les premiers intervalles 125 sont au nombre de deux. Les deux intervalles 125 s'étendent chacun entre une des deux surfaces principales de la pièce 100 et le deuxième intervalle 127. On peut voir encore que dans l'exemple illustré les deux intervalles

125 comprennent le même nombre de sillons 123, et qu'ils ont donc la même largeur. On comprendra toutefois que selon d'autres variantes du présent mode de réalisation, les deux intervalles 125 pourraient ne pas comprendre le même nombre de sillons. On peut encore préciser que, dans le mode de réalisation illustré, les sillons qui forment les premiers intervalles 125 sont des sillons étroits qui peuvent avoir par exemple une largeur de 1 μm et une profondeur comprise entre 10 nm et 2 μm .

[0023] La présente invention concerne également un procédé permettant de fabriquer des pièces de micro-mécanique horlogère comme celles qui font l'objet des figures annexées 2A, 2B, 2C et 3. Un mode particulier de mise en œuvre de procédé de l'invention va maintenant être décrit.

[0024] Le procédé de l'invention comporte une première étape consistant à se munir d'un substrat en silicium en forme de plaque. Bien entendu, le substrat pourrait ne pas être entièrement constitué de silicium ou encore être constitué par du silicium dopé. Le substrat pourrait être formé de silicium sur isolant (du SOI selon son abréviation anglaise). Comme le sait l'homme du métier, un tel substrat à structure sandwich comporte deux couches de silicium reliées par une couche intermédiaire en oxyde de silicium. Le substrat pourrait alternativement être constitué d'une couche de silicium rapportée sur un autre type de base comme par exemple du métal.

[0025] L'étape suivante du procédé consiste à déposer et à structurer un masque de gravure ajouré sur une surface horizontale du substrat. Le masque de gravure est formé sur une des deux faces principales du substrat en forme de plaque. Si on se réfère aux figures 2A, 2B, 2C et 3, on comprendra que dans les exemples illustrés le masque de gravure est formé sur la face horizontale supérieure du substrat. Le masque est formé à partir d'un matériau capable de résister aux étapes de gravure subséquentes. Conformément au présent exemple, le masque de gravure est réalisé en oxyde de silicium.

[0026] Le procédé se poursuit par une étape consistant à attaquer par gravure ionique réactive la surface exposée du substrat à travers les ajours du masque, de manière à creuser dans le substrat sur une profondeur égale à une première distance. La gravure ionique réactive est connue de l'homme du métier en tant que telle. Le gaz le plus utilisé pour l'étape de gravure est le SF_6 , et les principaux paramètres permettant d'optimiser la gravure sont le flux de SF_6 qui est avantageusement compris entre 200 et 780 sccm, et de préférence compris entre 350 et 600 sccm ; la puissance de la radiofréquence servant à exciter le plasma qui est avantageusement comprise entre 1000 et 3000 Watts à 2.45 GHz, et de préférence entre 1500 et 2600 Watts à 2.45 GHz ; et la durée d'une étape de gravure qui est avantageusement comprise entre 0.8 secondes et 35 secondes et de préférence comprise entre 1.5 et 7 secondes. Les paramètres sont choisis de manière à ce que, à la fin de l'étape, la gravure ionique ait creusé le substrat en silicium sur une profondeur égale à une première distance prédéfinie (par exem-

ple 2 microns en ce qui concerne l'exemple de la figure 2A).

[0027] L'étape suivante du procédé consiste à déposer une couche de passivation chimiquement inerte sur les surfaces exposées par la gravure durant l'étape précédente. Le gaz le plus utilisé pour l'étape de passivation est le C_4F_8 , et les principaux paramètres permettant d'optimiser le dépôt de la couche de passivation sont le flux de C_4F_8 qui est avantageusement compris entre 10 et 780 sccm, et de préférence compris entre 50 et 400 sccm ; la puissance de la radiofréquence servant à exciter le plasma qui est avantageusement comprise entre 1000 et 3000 Watts à 2.45 GHz, et de préférence entre 1500 et 2600 Watts à 2.45 GHz ; et la durée d'une étape de passivation qui est avantageusement comprise entre 0.8 secondes et 20 secondes et de préférence comprise entre 1 et 4 secondes.

[0028] La séquence de procédé comprenant l'étape de gravure et l'étape de passivation qui viennent d'être décrites est ensuite répétée. Cette première séquence itérative est exécutée consécutivement un premier nombre (n) prédéterminé de fois, ou de manière équivalente, la première séquence itérative est effectuée autant de fois qu'il y a de sillons dans un premier intervalle (autrement dit 2 fois dans l'exemple qui fait l'objet de la figure 2A, 1 fois selon la figure 2B et 5 fois selon la figure 2C).

[0029] Pour graver des sillons plus profonds en conservant la même largeur de sillon, il est possible d'adapter les paramètres du procédé de gravure. On peut par exemple faire varier simultanément le flux du gaz réactif et la durée d'une étape de gravure. En effet, en augmentant le flux de gaz actif, on accélère la gravure. Toutefois, on augmente ainsi aussi la densité des molécules de gaz réactif, ce qui rend la gravure plus isotrope, et rend donc les sillons plus profonds. Pour jouer sur la profondeur des sillons, le facteur flux de gaz est donc plus important que la durée de l'étape de gravure.

[0030] Lorsque le procédé a terminé la gravure d'un premier intervalle comme ci-dessus, l'étape suivante du procédé consiste à attaquer par gravure ionique réactive la surface exposée du substrat à travers les ajours du masque, de manière à creuser dans le substrat sur une profondeur égale à une deuxième distance différente de la première distance. Les paramètres de gravures sont choisis de manière à ce que, à la fin de l'étape, la gravure ionique ait creusé le substrat en silicium sur une profondeur égale à la deuxième distance prédéfinie (par exemple 8 microns en ce qui concerne l'exemple de la figure 2A). L'étape suivante du procédé consiste à déposer une couche de passivation chimiquement inerte sur les surfaces exposées par la gravure durant l'étape précédente.

[0031] La séquence de procédé comprenant l'étape de gravure et l'étape de passivation qui viennent d'être décrites est ensuite répétée. Cette deuxième séquence itérative est exécutée consécutivement un deuxième nombre (m) prédéterminé de fois, ou de manière équivalente, la deuxième séquence itérative est effectuée autant de fois qu'il y a de sillons dans un deuxième in-

tervalle (autrement dit, 1 fois dans chacun des exemples illustrés par les figures 2A, 2B, 2C et 3). Lorsque le procédé a terminé la gravure d'un deuxième intervalle comme ci-dessus, le déroulement du procédé retourne au début de la première séquence itérative de manière à commencer à graver un nouveau premier intervalle.

[0032] La séquence de procédé consistant à graver d'abord un premier intervalle et ensuite un deuxième intervalle peut elle-même être répétée. Cette troisième séquence itérative est exécutée un troisième nombre (v) déterminé de fois, ou de manière équivalente, la troisième séquence itérative est effectuée une fois pour chaque deuxième intervalle que présente la surface côtelée du bord découpé de la pièce.

[0033] La pièce de micromécanique horlogère est ensuite débarrassée de son masque avant d'être, de préférence, recouverte d'une couche d'oxyde de silicium avant qu'elle ne soit finalement libérée du substrat.

[0034] La figure 4 est un double graphique montrant l'évolution du flux du gaz réactif et du flux du gaz de passivation durant six étapes consécutives d'une mise en œuvre particulière du procédé de l'invention utilisé pour réaliser les pièces de micromécanique horlogère qui font l'objet des figures 2A, 2B, 2C et 3. Le mode de mise en œuvre de la figure 4 permet plus spécifiquement de réaliser la pièce de micromécanique de l'exemple de la figure 2A. Le graphique montre une première séquence itérative comprenant une étape de gravure G1 suivie d'une étape de passivation P1. Durant l'étape de gravure, le flux de SF6 est de 400 sccm pendant 5 secondes. Durant l'étape de passivation, le flux de C4F8 est de 200 sccm pendant 2 secondes. Comme on peut le voir, la première séquence itérative est ensuite répétée une fois de manière à achever un premier intervalle formé de deux sillons. Une fois achevé le premier intervalle, le procédé passe à une deuxième séquence constituée par une étape de gravure G2 suivie d'une étape de passivation P2. Durant l'étape de gravure G2, le flux de SF6 est de 400 sccm pendant 35 secondes. Durant l'étape de passivation P2, le flux de C4F8 est de 200 sccm pendant 15 secondes.

[0035] On a vu que, conformément à l'invention, la surface des bords découpés de la pièce de micromécanique horlogère est côtelée et comprend une alternance de côtes et de sillons rectilignes. Conformément aux deux modes de réalisation décrits jusqu'ici, ces côtes et ces sillons étaient horizontaux, ou autrement dit, contenus chacun dans un plan parallèle à la plaque. La vue partielle schématique en plan de la figure 5 illustre un troisième mode exemplaire de réalisation de l'invention, la pièce de micromécanique étant constituée par une roue d'échappement. Conformément à ce mode de réalisation, les côtes et les sillons sont orientés perpendiculairement au plan principal de la roue d'échappement. La vue partielle de la figure 5 ne montre qu'une seule des dents (référéncée 200) de la roue d'échappement. Comme le montre la figure, le plan d'impulsion de la dent 200 présente une alternance de côtes 221 et de sillons 223 qui sont recti-

lignes et verticaux. On peut observer que les côtes 221 et les sillons 223 forment un motif échelonné, avec des premiers intervalles 225 dans lesquels les sillons 223 sont étroits, et des deuxième intervalles 227 dans lequel les sillons sont larges. De plus, les côtes 221 et les sillons 223 présentent un motif qui se répète de manière périodique sur toute la largeur du plan d'impulsion de la dent 200.

[0036] Pour réaliser un lot de pièces de micromécanique horlogère qui sont conformes à l'invention et qui comportent des surfaces texturées verticalement, on peut avoir recours à un procédé de fabrication d'une pièce de micromécanique en silicium mono- ou poly-cristallin comportant les étapes suivantes :

- a) se munir d'un substrat en silicium ;
- b) déposer et structurer un masque de gravure ajouré sur une surface horizontale du substrat ;
- c) attaquer par gravure ionique réactive la surface du substrat à travers les ajours du masque, de manière à creuser dans le substrat jusqu'à atteindre une première distance ;
- d) déposer un couche de passivation chimiquement inerte sur les surfaces exposées par la gravure durant l'étape précédente ;
- e) répéter l'exécution d'une séquence d'étapes comprenant l'étape (c) suivie de l'étape (d) jusqu'à ce que la séquence ait été effectuée un nombre déterminé de fois, ou que la gravure ionique réactive ait creusé à travers toute l'épaisseur du substrat ;
- f) libérer la pièce de micromécanique du masque et du substrat ; caractérisé en ce que, durant l'étape (b), on structure le masque de gravure de manière à ce que les bords des ouvertures du masque ajouré ne soient pas lisses, mais présentent au contraire un profil festonné constitué d'une alternance de proéminences et de creux qui forment un motif échelonné avec une pluralité de premiers intervalles dans lesquels l'espacement séparant les proéminences les unes des autres est égal à une première distance, et des deuxième intervalles dans lequel l'espacement entre les proéminences est égal à une deuxième distance différente de la première distance, la première distance étant comprise entre 200 nm et 5 μ m, et de préférence comprise entre 200 nm et 2 μ m.

[0037] On comprendra en outre que diverses modifications et/ou améliorations évidentes pour un homme du métier peuvent être apportées aux modes de réalisation qui font l'objet de la présente description sans sortir du cadre de la présente invention définie par les revendications annexées. En particulier, bien que l'invention ait été décrite en relation avec une roue d'échappement et une ancre, il est clair que l'invention ne concerne pas uniquement les composants des échappements, mais qu'elle concerne de manière tout à fait générale l'ensemble des pièces de micromécanique horlogère.

Revendications

1. Pièce de micromécanique horlogère (1 ; 10 ; 20 ; 100 ; 200) découpée dans un substrat en silicium en forme de plaque et dont les bords découpés comprennent des portions prévues pour servir de surfaces de contact agencées pour glisser contre des zones de contact correspondantes d'une autre pièce de micromécanique dans un pièce d'horlogerie, et dans laquelle les bords découpés présentent une surface côtelée comprenant une alternance de côtes (21a ; 21b ; 21c ; 121 ; 221) et de sillons (23a ; 23b ; 23c ; 123 ; 223), les côtes et les sillons étant rectilignes ; **caractérisé en ce que** les côtes et les sillons forment un motif échelonné, comprenant une pluralité de premiers intervalles (25a ; 25b ; 25c ; 125 ; 225) dans lesquels l'espacement séparant les côtes les unes des autres est égal à une première distance, et au moins un deuxième intervalle (27a ; 27b ; 27c ; 127 ; 227) dans lequel l'espacement entre les côtes est égal à une deuxième distance différente de la première distance, la première distance étant comprise entre 200 nm et 5 μ m. 5
2. Pièce de micromécanique horlogère (1 ; 10 ; 20 ; 100 ; 200) selon la revendication 1, **caractérisée en ce que** la première distance est comprise entre 200 nm et 2 μ m. 10
3. Pièce de micromécanique horlogère (1 ; 10 ; 20 ; 100) selon la revendication 1 ou 2, **caractérisée en ce que** les côtes et les sillons sont contenus chacun dans un plan parallèle à la plaque. 15
4. Pièce de micromécanique horlogère (200) selon la revendication 1 ou 2, **caractérisée en ce que** les côtes et les sillons sont perpendiculaires aux faces principales de la plaque. 20
5. Pièce de micromécanique horlogère (1 ; 10 ; 20 ; 100 ; 200) selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** la deuxième distance est plus grande que la première distance. 25
6. Pièce de micromécanique horlogère (1 ; 10 ; 20 ; 100 ; 200) selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** les sillons appartenant aux premiers intervalles (25a, 25b, 25c ; 125 ; 225) ont tous la même première profondeur. 30
7. Pièce de micromécanique horlogère (1 ; 10 ; 20 ; 200) selon la revendication 5 ou selon les revendications 5 et 6, **caractérisée en ce que** le motif échelonné comprend une pluralité de deuxième intervalles (27a ; 27b ; 27c ; 227), et **en ce que** la deuxième distance est comprise entre 200 nm et 50 μ m. 35
8. Pièce de micromécanique horlogère (1 ; 10 ; 20 ; 200) selon la revendication 7, **caractérisée en ce que** les sillons appartenant aux deuxième intervalles (27a ; 27b ; 27c ; 227) ont tous la même profondeur, et **en ce que** la deuxième profondeur est comprise entre 10 nm et 10 μ m. 40
9. Pièce de micromécanique horlogère (100) selon la revendication 5 ou selon les revendications 5 et 6, **caractérisée en ce que** le motif échelonné comprend un unique deuxième intervalle (127) comprenant un unique sillon (123), et **en ce que** la deuxième distance est comprise entre 200 nm et les 2/3 de la hauteur totale de la pièce. 45
10. Pièce de micromécanique horlogère (100) selon la revendication 9, **caractérisée en ce que** la profondeur de l'unique sillon (123) du deuxième intervalle (127) est comprise entre 10 nm et 50 μ m. 50
11. Pièce de micromécanique horlogère (1 ; 10 ; 20 ; 100) selon les revendications 3 et 6, **caractérisée en ce que** la première profondeur est comprise entre 10 nm et 2 μ m. 55
12. Pièce de micromécanique horlogère (200) selon les revendications 4 et 6, **caractérisée en ce que** la première profondeur est comprise entre 500 nm et 4 μ m.
13. Procédé de fabrication d'une pièce de micromécanique en silicium mono-ou poly-cristallin et qui est conforme aux revendications 1 et 3, le procédé comportant les étapes suivantes :
 - a) se munir d'un substrat en silicium ;
 - b) déposer et structurer un masque de gravure ajouré sur une surface horizontale du substrat ;
 - c) attaquer par gravure ionique réactive la surface du substrat à travers les ajours du masque, de manière à creuser dans le substrat jusqu'à atteindre une première distance ;
 - d) déposer une couche de passivation chimiquement inerte sur les surfaces exposées par la gravure durant l'étape précédente ;
 - e) répéter l'exécution d'une première séquence d'étapes comprenant l'étape (c) suivie de l'étape (d) jusqu'à ce que la première séquence ait été effectuée un premier nombre prédéterminé (n) de fois, pour autant que la gravure ionique réactive n'ait pas creusé à travers toute l'épaisseur du substrat ;
 - f) libérer la pièce de micromécanique du masque et du substrat ;

caractérisé en ce que le procédé comporte entre l'étape e) et l'étape f) une deuxième séquence d'étapes à n'effectuer que si l'étape e) n'a pas encore été

effectuée un troisième nombre déterminé (v) de fois durant l'exécution du procédé, la deuxième séquence comprenant les étapes suivantes :

- x) attaquer par gravure ionique réactive la surface du substrat à travers les ajours du masque, de manière à creuser dans le substrat jusqu'à atteindre une deuxième distance différente de la première distance ;
- y) déposer une couche de passivation chimiquement inerte sur les surfaces exposées par la gravure durant l'étape précédente ;
- z) répéter l'exécution d'une deuxième séquence d'étapes comprenant l'étape x) suivie de l'étape y), jusqu'à ce que la deuxième séquence ait été effectuée un deuxième nombre prédéterminé (m) de fois ; puis retourner à l'étape c).

14. Procédé de fabrication d'une pièce de micromécanique en silicium mono-ou poly-cristallin et qui est conforme aux revendications 1 et 4, le procédé comportant les étapes suivantes :

- a) se munir d'un substrat en silicium ;
- b) déposer et structurer un masque de gravure ajouré sur une surface horizontale du substrat ;
- c) attaquer par gravure ionique réactive la surface du substrat à travers les ajours du masque, de manière à creuser dans le substrat jusqu'à atteindre une première distance ;
- d) déposer une couche de passivation chimiquement inerte sur les surfaces exposées par la gravure durant l'étape précédente ;
- e) répéter l'exécution d'une séquence d'étapes comprenant l'étape (c) suivie de l'étape (d) jusqu'à ce que la séquence ait été effectuée un nombre déterminé de fois, ou que la gravure ionique réactive ait creusé à travers toute l'épaisseur du substrat ;
- f) libérer la pièce de micromécanique du masque et du substrat ;

caractérisé en ce que, durant l'étape (b), on structure le masque de gravure de manière à ce que les bords des ouvertures du masque ajouré ne soient pas lisses, mais présentent au contraire un profil festonné constitué d'une alternance de proéminences et de creux qui forment un motif échelonné avec une pluralité de premiers intervalles dans lesquels l'espacement séparant les proéminences les unes des autres est égal à une première distance, et au moins un deuxième intervalle dans lequel l'espacement entre les proéminences est égal à une deuxième distance différente de la première distance, la première distance étant comprise entre 500 nm et 4 μ m.

15. Procédé de fabrication d'une pièce de micromécanique conforme à la revendication 14, **caractérisé**

en ce que la première distance est comprise entre 200 nm et 2 μ m.

5 Patentansprüche

1. Mikromechanisches Uhrenbauteil (1; 10; 20; 100; 200), das in einem Substrat aus Silizium in Plattenform ausgeschnitten wird und dessen ausgeschnittene Ränder Abschnitte umfassen, die dazu vorgesehen sind, als Kontaktflächen zu dienen, die gestaltet sind, um gegen entsprechende Kontaktzonen eines anderen mikromechanischen Bauteils in einer Uhr zu gleiten, und wobei die ausgeschnittenen Ränder eine gerippte Fläche aufweisen, die einen Wechsel von Rippen (21a; 21b; 21c; 121; 221) und Furchen (23a; 23b; 23c; 123; 223) umfasst, wobei die Rippen und die Furchen geradlinig sind; **dadurch gekennzeichnet, dass** die Rippen und die Furchen ein abgestuftes Motiv bilden, das mehrere erste Intervalle (25a; 25b; 25c; 125; 225), in denen der Zwischenraum, der die Rippen voneinander trennt, gleich einem ersten Abstand ist, und mindestens ein zweites Intervall (27a; 27b; 27c; 127, 227) umfasst, in dem der Zwischenraum zwischen den Rippen gleich einem zweiten Abstand ist, der sich von dem ersten Abstand unterscheidet, wobei der erste Abstand zwischen 200 nm und 5 μ m beträgt.
2. Mikromechanisches Uhrenbauteil (1; 10; 20; 100; 200) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der erste Abstand zwischen 200 nm und 2 μ m beträgt.
3. Mikromechanisches Uhrenbauteil (1; 10; 20; 100) nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Rippen und die Furchen jeweils in einer Ebene parallel zu der Platte enthalten sind.
4. Mikromechanisches Uhrenbauteil (200) nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Rippen und die Furchen senkrecht zu den Hauptseiten der Platte sind.
5. Mikromechanisches Uhrenbauteil (1; 10; 20; 100; 200) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der zweite Abstand größer als der erste Abstand ist.
6. Mikromechanisches Uhrenbauteil (1; 10; 20; 100; 200) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Furchen, die zu den ersten Intervallen (25a, 25b, 25c; 125; 225) gehören, alle die gleiche Tiefe aufweisen.
7. Mikromechanisches Uhrenbauteil (1; 10; 20; 200) nach Anspruch 5 oder nach Anspruch 5 und 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** das abgestufte Motiv

eine Vielzahl von zweiten Intervallen (27a; 27b; 27c; 227) umfasst, und dadurch, dass der zweite Abstand zwischen 200 nm und 50 μm beträgt.

8. Mikromechanisches Uhrenbauteil (1; 10; 20; 200) nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Furchen, die zu den zweiten Intervallen (27a; 27b; 27c; 227) gehören, alle die gleiche Tiefe aufweisen, und dadurch, dass die zweite Tiefe zwischen 10 nm und 10 μm beträgt. 5
10
9. Mikromechanisches Uhrenbauteil (100) nach Anspruch 5 oder nach Anspruch 5 und 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** das abgestufte Motiv ein einziges zweites Intervall (127) umfasst, das eine einzige Furche (123) umfasst, und dadurch, dass der zweite Abstand zwischen 200 nm und 2/3 der Gesamthöhe des Bauteils beträgt. 15
10. Mikromechanisches Uhrenbauteil (100) nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Tiefe der einzigen Furche (123) des zweiten Intervalls (127) zwischen 10 nm und 50 μm beträgt. 20
11. Mikromechanisches Uhrenbauteil (1; 10; 20; 100) nach Anspruch 3 und 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste Tiefe zwischen 10 nm und 2 μm beträgt. 25
12. Mikromechanisches Uhrenbauteil (200) nach Anspruch 4 und 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste Tiefe zwischen 500 nm und 4 μm beträgt. 30
13. Verfahren zur Herstellung eines mikromechanischen Bauteils aus monokristallinem oder polykristallinem Silizium nach Anspruch 1 und 3, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst: 35
 - a) Bereitstellen eines Substrats aus Silizium;
 - b) Abscheiden und Strukturieren einer durchbrochenen Ätzmaske auf einer horizontalen Fläche des Substrats;
 - c) Angreifen der Fläche des Substrats durch die Durchbrechungen der Maske durch reaktives Ionenätzen, derart dass in dem Substrat gegraben wird, bis ein erster Abstand erreicht wird;
 - d) Abscheiden einer chemisch inerten Passivierungsschicht auf den durch das Ätzen während des vorhergehenden Schritts freigelegten Flächen;
 - e) Wiederholen der Ausführung einer ersten Folge von Schritten, die den Schritt (c), gefolgt vom Schritt (d) umfasst, bis die erste Folge eine erste vorbestimmte Anzahl (n) von Malen durchgeführt wurde, soweit das reaktive Ionenätzen nicht durch die gesamte Dicke des Substrats gegraben hat;
 - f) Befreien des mikromechanischen Bauteils

von der Maske und dem Substrat;

dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren zwischen dem Schritt e) und dem Schritt f) eine zweite Folge von Schritten umfasst, die lediglich durchzuführen sind, wenn der Schritt e) während der Ausführung des Verfahrens noch keine bestimmte Anzahl (v) von Malen durchgeführt wurde, wobei die zweite Folge die folgenden Schritte umfasst:

x) Angreifen der Fläche des Substrats durch die Durchbrechungen der Maske durch reaktives Ionenätzen, derart dass in dem Substrat gegraben wird, bis ein zweiter Abstand erreicht wird, der sich von dem ersten Abstand unterscheidet;

y) Abscheiden einer chemisch inerten Passivierungsschicht auf den durch das Ätzen während des vorhergehenden Schritts freigelegten Flächen;

z) Wiederholen der Ausführung einer zweiten Folge von Schritten, die den Schritt x), gefolgt vom Schritt y) umfasst, bis die zweite Folge eine zweite vorbestimmte Anzahl (m) von Malen durchgeführt wurde; dann Zurückkehren zum Schritt c).

14. Verfahren zur Herstellung eines mikromechanischen Bauteils aus mono- oder polykristallinem Silizium nach Anspruch 1 und 4, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- a) Bereitstellen eines Substrats aus Silizium;
- b) Abscheiden und Strukturieren einer durchbrochenen Ätzmaske auf einer horizontalen Fläche des Substrats;
- c) Angreifen der Fläche des Substrats durch die Durchbrechungen der Maske durch reaktives Ionenätzen, derart dass in dem Substrat gegraben wird, bis ein erster Abstand erreicht wird;
- d) Abscheiden einer chemisch inerten Passivierungsschicht auf den durch das Ätzen während des vorhergehenden Schritts freigelegten Flächen;
- e) Wiederholen der Ausführung einer Folge von Schritten, die den Schritt (c), gefolgt vom Schritt (d) umfasst, bis die Folge eine vorbestimmte Anzahl von Malen durchgeführt wurde, oder das reaktive Ionenätzen durch die gesamte Dicke des Substrats gegraben hat;
- f) Befreien des mikromechanischen Bauteils von der Maske und dem Substrat;

dadurch gekennzeichnet, dass während des Schrittes (b) die Ätzmaske derart strukturiert wird, dass die Ränder der Öffnungen der durchbrochenen Maske nicht glatt sind, sondern im Gegenteil ein ausgebogtes Profil aufweisen, das aus einem Wechsel von Erhabenheiten und Höhlungen besteht, die ein

abgestuftes Motiv mit mehreren ersten Intervallen, in denen der Zwischenraum, der die Erhabenheiten voneinander trennt, gleich einem ersten Abstand ist, und mindestens einem zweiten Intervall bilden, in dem der Zwischenraum zwischen den Erhabenheiten gleich einem zweiten Abstand ist, der sich von dem ersten Abstand unterscheidet, wobei der erste Abstand zwischen 500 nm und 4 μm beträgt.

15. Verfahren zur Herstellung eines mikromechanischen Bauteils nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** der erste Abstand zwischen 200 nm und 2 μm beträgt.

Claims

1. Micro-mechanical timepiece part (1; 10; 20; 100; 200) cut out in a silicon substrate in the form of a plate and the cut edges of which comprise portions provided to serve as contact surfaces arranged to slide against corresponding contact zones of another micro-mechanical part in a timepiece, and wherein the cut edges have a ribbed surface comprising an alternation of ribs (21a; 21b; 21c; 121; 221) and furrows (23a; 23b; 23c; 123; 223), the ribs and the furrows being straight; **characterised in that** the ribs and the furrows form a staggered pattern, comprising a plurality of first intervals (25a; 25b; 25c; 125; 225) in which the spacing separating the ribs from each other is equal to a first distance, and at least one second interval (27a; 27b; 27c; 127; 227) in which the spacing between the ribs is equal to a second distance different from the first distance, the first distance being between 200 nm and 5 μm .
2. Micro-mechanical timepiece part (1; 10; 20; 100; 200) as claimed in claim 1, **characterised in that** the first distance is between 200 nm and 2 μm .
3. Micro-mechanical timepiece part (1; 10; 20; 100) as claimed in claim 1 or 2, **characterised in that** the ribs and the furrows are each contained within a plane parallel to the plate.
4. Micro-mechanical timepiece part (200) as claimed in claim 1 or 2, **characterised in that** the ribs and the furrows are perpendicular to the main faces of the plate.
5. Micro-mechanical timepiece part (1; 10; 20; 100; 200) as claimed in any one of the preceding claims, **characterised in that** the second distance is greater than the first distance.
6. Micro-mechanical timepiece part (1; 10; 20; 100; 200) as claimed in any one of the preceding claims, **characterised in that** the furrows belonging to the

first intervals (25a, 25b, 25c; 125; 225) are all of the same depth.

7. Micro-mechanical timepiece part (1; 10; 20; 200) as claimed in claim 5 or as claimed in claims 5 and 6, **characterised in that** the staggered pattern comprises a plurality of second intervals (27a; 27b; 27c; 227), and **in that** the second distance is between 200 nm and 50 μm .
8. Micro-mechanical timepiece part (1; 10; 20; 200) as claimed in claim 7, **characterised in that** the furrows belonging to the second intervals (27a; 27b; 27c; 227) are all of the same depth, and **in that** the second depth is between 10 nm and 10 μm .
9. Micro-mechanical timepiece part (100) as claimed in claim 5 or as claimed in claims 5 and 6, **characterised in that** the staggered pattern comprises a single second interval (127) comprising a single furrow (123), and **in that** the second distance is between 200 nm and 2/3 of the total height of the part.
10. Micro-mechanical timepiece part (100) as claimed in claim 9, **characterised in that** the depth of the single furrow (123) of the second interval (127) is between 10 nm and 50 μm .
11. Micro-mechanical timepiece part (1; 10; 20; 100) as claimed in claims 3 and 6, **characterised in that** the first depth is between 10 nm and 2 μm .
12. Micro-mechanical timepiece part (200) as claimed in claims 4 and 6, **characterised in that** the first depth is between 500 nm and 4 μm .
13. Method of manufacturing a micro-mechanical part of monocrystalline or polycrystalline silicon and which is as claimed in claims 1 and 3, the method comprising the following steps:
 - a) obtaining a silicon substrate;
 - b) depositing and structuring an openwork etching resist on a horizontal surface of the substrate;
 - c) etching by reactive-ion etching the surface of the substrate through the openings in the resist so as to hollow out the substrate down to a first distance;
 - d) depositing a chemically inert passivation layer on the surfaces exposed by the etching during the preceding step;
 - e) repeating the execution of a first sequence of steps comprising step (c) followed by step (d) until the first sequence has been effected a predetermined first number (n) of times, in as far as the reactive-ion etching has not hollowed through the entire thickness of the substrate;

f) releasing the micro-mechanical part from the resist and from the substrate;

characterised in that between step e) and step f), the method comprises a second sequence of steps to be effected only if step e) has not yet been effected a specific third number (v) of times during the execution of the method, the second sequence comprising the following steps:

x) etching by reactive-ion etching the surface of the substrate through the openings in the resist so as to hollow out the substrate down to a second distance different from the first distance;
 y) depositing a chemically inert passivation layer on the surfaces exposed by the etching during the preceding step;
 z) repeating the execution of a second sequence of steps comprising step x) followed by step y) until the second sequence has been effected a predetermined second number (m) of times; then returning to step c).

14. Method of manufacturing a micro-mechanical part of monocrystalline or polycrystalline silicon and which is as claimed in claims 1 and 4, the method comprising the following steps:

a) obtaining a silicon substrate;
 b) depositing and structuring an openwork etching resist on a horizontal surface of the substrate;
 c) etching by reactive-ion etching the surface of the substrate through the openings in the resist so as to hollow out the substrate down to a first distance;
 d) depositing a chemically inert passivation layer on the surfaces exposed by the etching during the preceding step;
 e) repeating the execution of a sequence of steps comprising step (c) followed by step (d) until the sequence has been effected a specific number of times or the reactive-ion etching has hollowed through the entire thickness of the substrate;
 f) releasing the micro-mechanical part from the resist and from the substrate;

characterised in that, during step (b), the etching resist is structured so that the edges of the openings in the openwork resist are not smooth but, on the contrary, have a scalloped profile formed by an alternation of projections and hollows which form a staggered pattern with a plurality of first intervals in which the spacing separating the projections from each other is equal to a first distance, and at least one second interval in which the spacing between the projections is equal to a second distance different

from the first distance, the first distance being between 500 nm and 4 μm .

15. Method of manufacturing a micro-mechanical part as claimed in claim 14, characterised in that the first distance is between 200 nm and 2 μm .

Fig.1

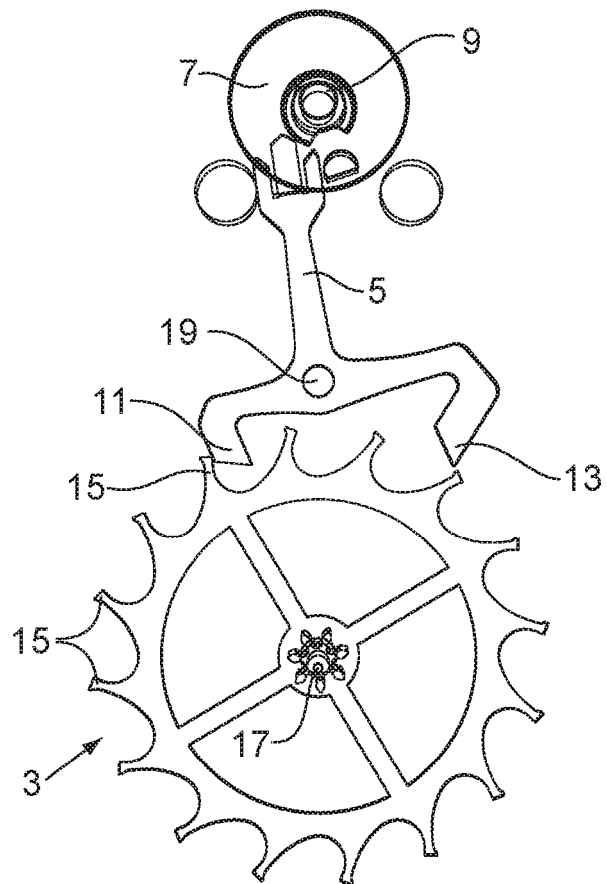


Fig.2A

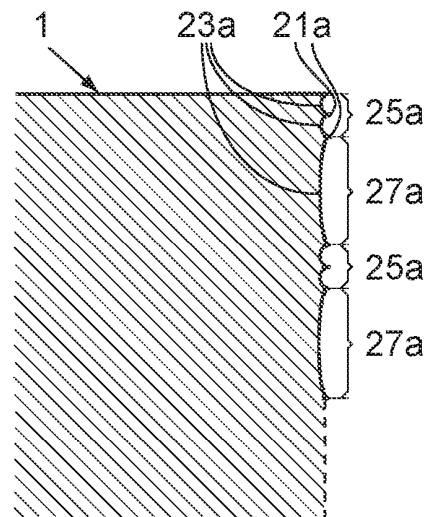


Fig.2B

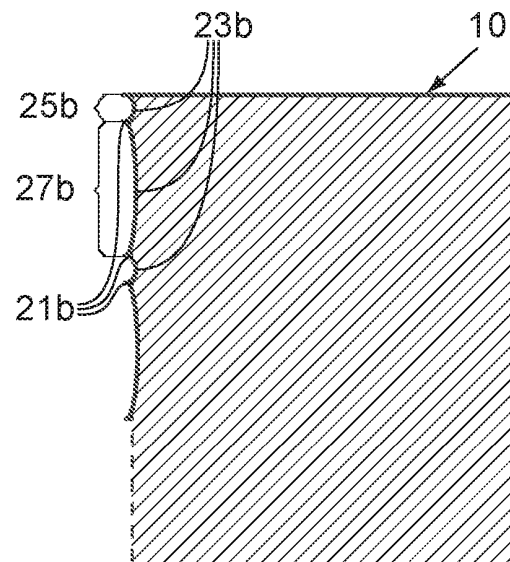


Fig.2C

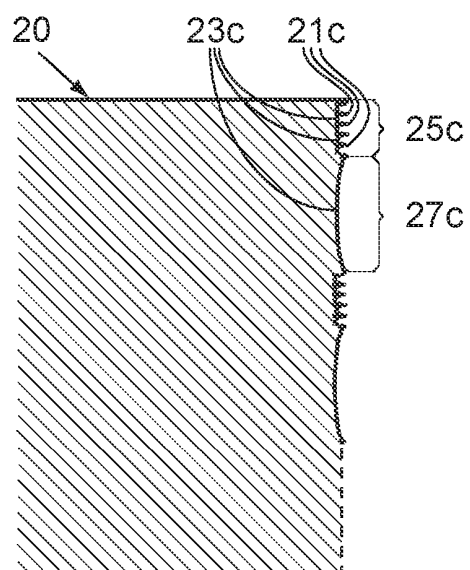


Fig.3

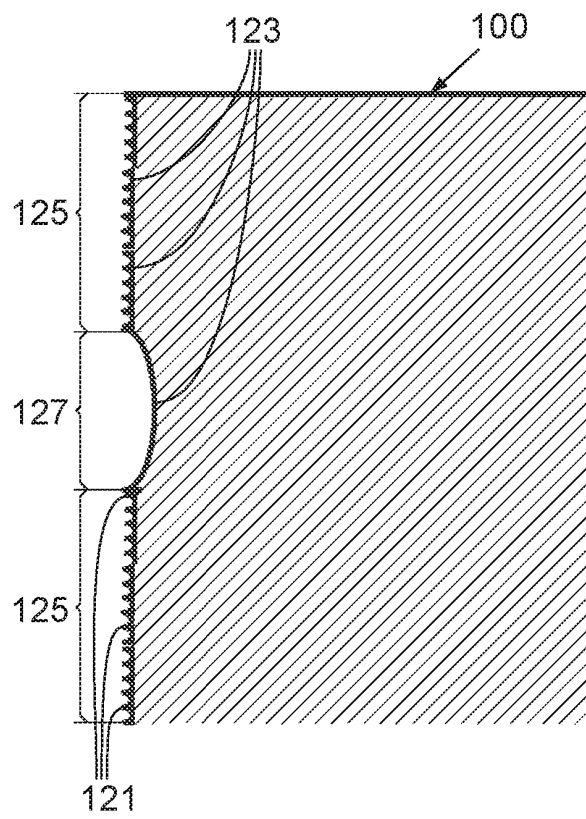


Fig.4

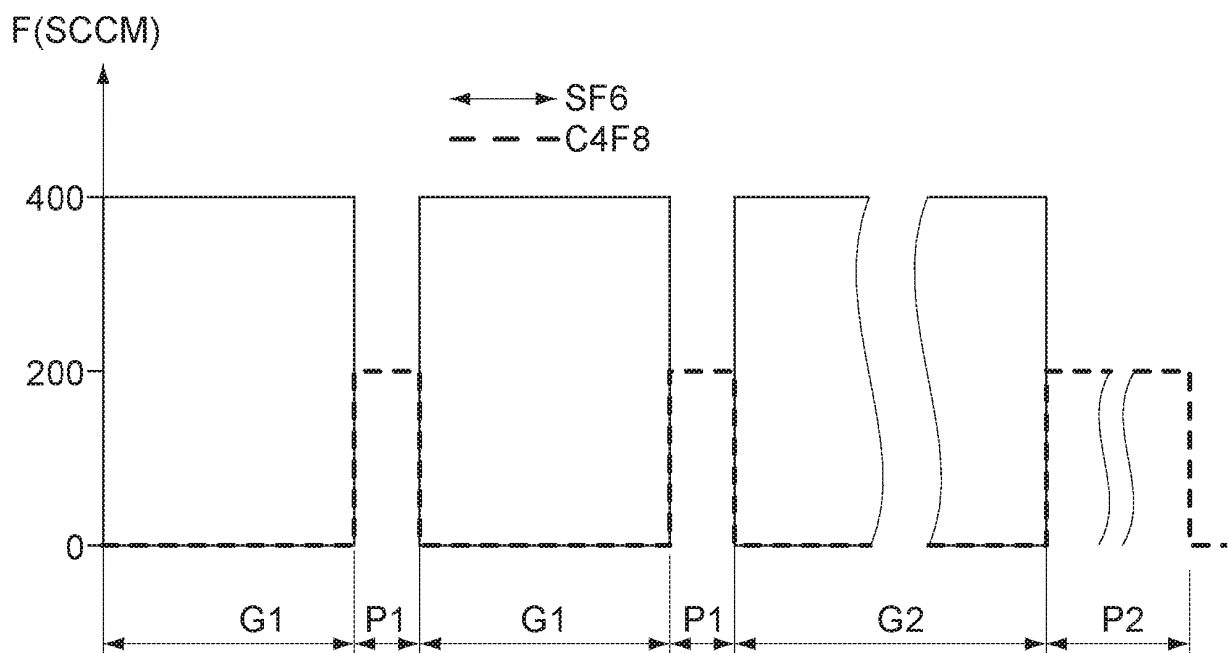
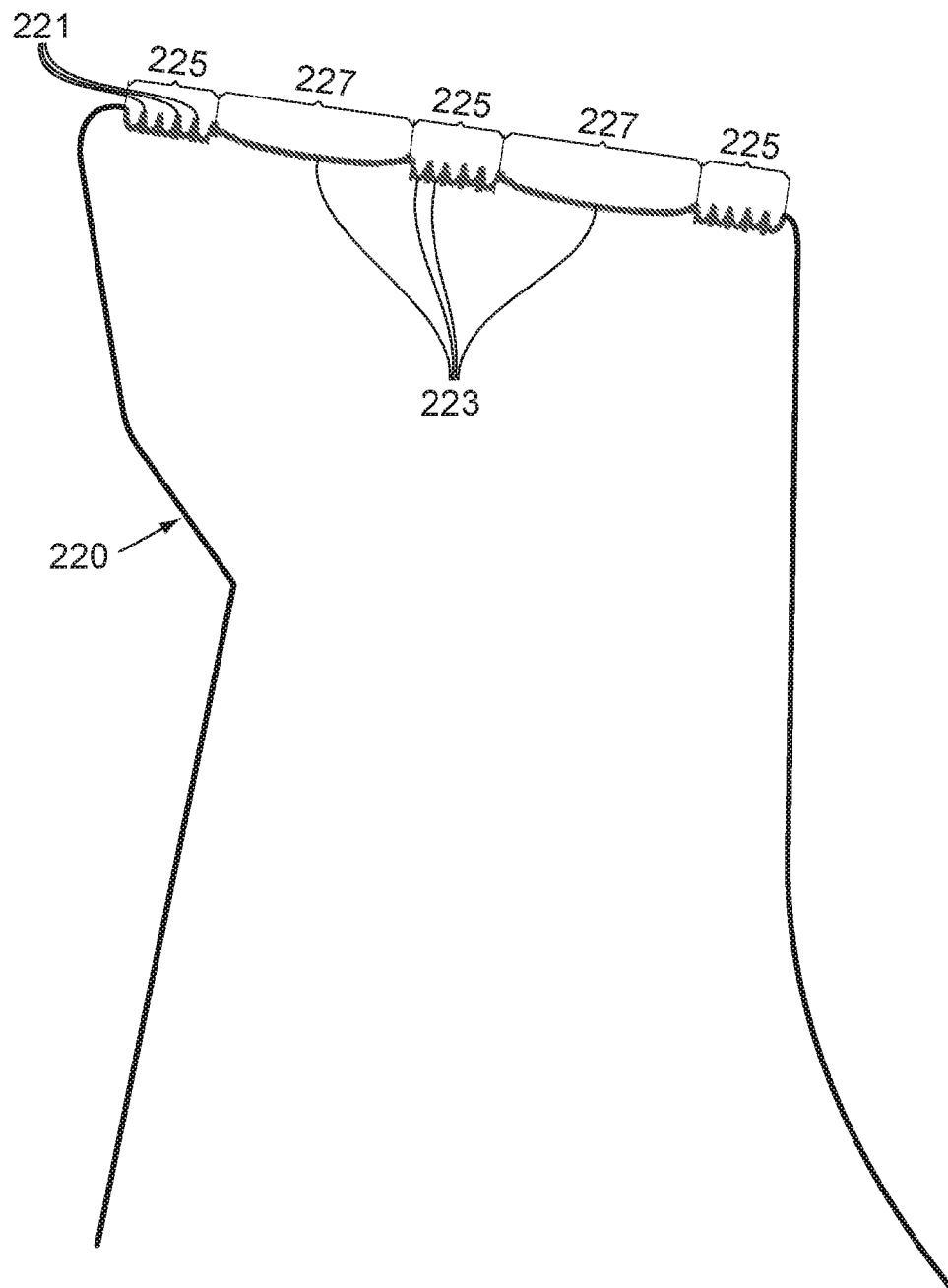


Fig.5



RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- EP 0732635 A [0003]
- US 5501893 A [0003]
- EP 3109200 A [0006]
- EP 3141520 A1 [0006]
- CH 710846 A2 [0006]