



CONFÉDÉRATION SUISSE  
INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) **CH** **703 445 B1**

(51) Int. Cl.: **B81C** 99/00 (2010.01)  
**G04D** 3/00 (2006.01)

**Brevet d'invention délivré pour la Suisse et le Liechtenstein**  
Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein

(12) **FASCICULE DU BREVET**

(21) Numéro de la demande: 00817/07

(22) Date de dépôt: 22.05.2007

(24) Brevet délivré: 31.01.2012

(45) Fascicule du brevet publié: 31.01.2012

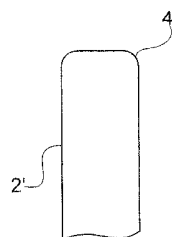
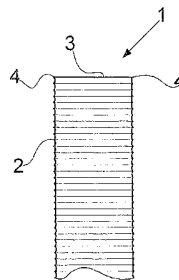
(73) Titulaire(s):  
CSEM Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique  
SA Recherche et Développement, Rue Jaquet-Droz 1  
2002 Neuchâtel (CH)

(72) Inventeur(s):  
Nicolas De Rooij, 2000 Neuchâtel (CH)  
Syvain Jeanneret, 2013 Colombier (CH)  
Michael Zikar, 4663 Aarburg (CH)

(74) Mandataire:  
GLN S.A., Puits-Godet 8A  
2000 Neuchâtel (CH)

(54) **Pièce micromécanique en silicium et son procédé de fabrication.**

(57) La présente invention concerne une pièce micromécanique en silicium (1), notamment pour mouvement d'horlogerie mécanique qui, après gravure selon un procédé de type RIE ou DRIE, subit un traitement de recuit en atmosphère réductrice pour améliorer ses propriétés mécaniques et, notamment, sa résistance aux chocs en arrondissant ses arêtes (4, 4') en lissant ses flancs rugueux (2) et en redistribuant son réseau cristallin perturbé par l'opération de gravure. L'invention concerne également le procédé utilisé pour obtenir une telle pièce.



## Description

### Domaine technique

[0001] La présente invention concerne une pièce micromécanique en silicium, en particulier destinée à équiper un mouvement mécanique horloger, dont les propriétés mécaniques sont améliorées grâce à un traitement de recuit sous atmosphère réductrice. L'invention concerne également le procédé de traitement desdites pièces micromécaniques en silicium.

### Etat de la technique

[0002] Le silicium est de plus en plus utilisé dans l'industrie horlogère pour réaliser des pièces mécaniques ou micromécaniques qui sont destinées à faire partie des mouvements des montres mécaniques. Le brevet EP 0 732 635 B1 décrit un procédé de fabrication de pièces micromécaniques en silicium revêtues d'une couche en un matériau dur pour en améliorer les qualités de frottement ainsi que leur résistance de surface. La demande de brevet EP 1 422 436 A1 décrit un ressort spiral pour montre mécanique dont le cœur est gravé dans une plaque de silicium et dont la surface externe est oxydée pour réduire sa dérive en fréquence avec la variation de la température. La demande internationale de brevet WO 2007/000 271 A1 propose d'améliorer les propriétés mécaniques des pièces en silicium d'un mouvement mécanique horloger par dépôt sur leur surface externe d'une couche épaisse d'un matériau amorphe tel que: SiO<sub>2</sub>, TiC, TiN, etc.

[0003] L'attrait du silicium est multiple. D'une part, il permet la fabrication simultanée d'un grand nombre de pièces («batch production») et, d'autre part, sa faible densité, sa dureté, sa résistance à la corrosion et son insensibilité aux champs magnétiques en font un matériau très intéressant pour les applications horlogères en permettant notamment d'améliorer l'isochronisme et la durée de marche des mouvements. En outre, la fabrication de telles pièces peut être réalisée avec une précision micrométrique. Un inconvénient, toutefois, du silicium réside dans sa relative fragilité aux chocs, laquelle rend la manipulation et le montage des pièces en silicium particulièrement délicats et contribue à réduire le rendement de fabrication car certaines de ces pièces se brisent suite à des chocs avec des outils ou d'autres composants.

[0004] Ce problème est encore aggravé par le fait que, pour le découpage des pièces dans un substrat de silicium, on utilise, le plus souvent, des techniques de gravure du type RIE («Reactive Ion Etching») ou DRIE («Deep Reactive Ion Etching») et, avec ces techniques, non seulement, il y a création d'arêtes vives entre des surfaces sécantes, comme par exemple des flancs et des parties supérieures et inférieures d'une pièce mais encore, les flancs présentent une rugosité et un défaut de planéité (ou «scalloping» selon la terminologie anglo-saxonne) défavorables pour les applications impliquant des contacts, ainsi que des ébréchures ou amorces de rupture qui accroissent la fragilité des pièces.

[0005] Enfin, le réseau cristallin du silicium qui constitue les pièces est perturbé par le procédé de gravure, ce qui diminue encore davantage la tenue aux chocs de celles-ci.

[0006] Dans la suite du présent texte, on entendra par l'expression «arête vive» une jonction entre deux surfaces sécantes suivant un angle indifférent, cette jonction présentant la forme d'une ligne qui peut être droite ou courbe. Par analogie, une «arête arrondie» qui assure la jonction entre deux surfaces sécantes est elle-même constituée par une surface.

### Divulgateion de l'invention

[0007] La présente invention a donc pour objet d'améliorer les propriétés mécaniques des pièces micromécaniques en silicium, destinées, notamment, aux mouvements mécaniques horlogers, en diminuant leur fragilité et en augmentant leur résistance aux chocs.

[0008] Dans ce but, la pièce micromécanique en silicium, ayant été gravée à l'aide d'un procédé de gravure sèche, présente au moins deux surfaces sécantes reliées l'une à l'autre par une jonction présentant la forme d'une arête arrondie après avoir été soumise à un traitement de recuit en atmosphère réductrice destiné à arrondir ses angles vifs et lisser ses surfaces rugueuses produits par le procédé de gravure.

[0009] L'invention concerne également un procédé de fabrication d'une pièce micromécanique en silicium comprenant les étapes de:

- gravure de la pièce dans une plaque de silicium à l'aide d'un procédé de type RIE ou DRIE,
- traitement de recuit de la pièce issue du procédé de gravure dans une atmosphère réductrice et sous des conditions qui favorisent la migration des atomes de silicium afin d'arrondir les arêtes vives, de lisser les surfaces externes et de renforcer la résistance aux chocs de ladite pièce.

### Breve description des dessins

[0010] D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description suivante d'un exemple de réalisation; ladite description étant faite à titre purement illustratif et en relation avec les dessins joints dans lesquels:

la fig. 1 montre une vue partielle d'une pièce d'horlogerie au sortir du procédé de gravure DRIE, et

la fig. 2 est une vue similaire montrant la pièce d'horlogerie après application du procédé de traitement thermique de l'invention.

### Mode(s) de réalisation de l'invention

[0011] On a montré, sur la fig. 1, une partie d'une pièce micromécanique, et plus particulièrement d'un composant horloger 1, qui présente des flancs verticaux 2 et une partie supérieure 3, respectivement associés à des plans sécants, ces flancs 2 et la partie supérieure 3 étant reliés par des jonctions en forme d'arêtes vives 4. Ce composant est obtenu à partir d'une plaquette (ou «wafer» selon la terminologie anglo-saxonne) en silicium par des procédés de gravure bien connus, tel le procédé de gravure à sec par plasma de type RIE ou DRIE. Ce composant peut être une roue dentée ou non, une roue d'échappement, une ancre, un balancier, une partie de rotor, une pierre, un pare-choc, une aiguille indicatrice, une came, une roue à colonnes, un plateau, une cheville, une levée, un ressort de rappel, un ressort spiral ou tout autre élément d'un mouvement de montre mécanique. Bien entendu, les techniques liées à la fabrication de composants en silicium qui sont issues des technologies de production des circuits intégrés permettent avantageusement de produire simultanément un grand nombre de ces composants aux propriétés identiques avec une précision de l'ordre du micromètre. Il est d'autant plus important que le rendement de fabrication et/ou de montage reste élevé pour garder le coût de fabrication à un niveau acceptable. Comme indiqué précédemment, les pièces produites par gravure à l'aide d'un procédé RIE ou DRIE montrent d'une part, une grande fragilité qui pèjore le rendement et, d'autre part, un état de surface défavorable des flancs verticaux. Comme on peut le voir sur la figure 1, les flancs verticaux présentent des sortes de vaguelettes dont les dimensions peuvent être de l'ordre d'une centaine de nanomètres. Par ailleurs, les arêtes vives peuvent être la cause de bien des problèmes. En effet, il peut se créer, sur ces arêtes, intrinsèquement fragiles du fait de leur géométrie, des ébréchures qui sont autant d'amorces de rupture en cas de chocs avec des outils ou d'autres composants. Enfin, comme cela a déjà été mentionné, le silicium est fragilisé dans sa masse par le procédé de gravure utilisé.

[0012] Selon l'invention, il est alors proposé d'appliquer, aux pièces en silicium issues de la gravure, un traitement de recuit (ou «thermal annealing» dans la terminologie anglo-saxonne) en atmosphère réductrice.

[0013] Un tel traitement est décrit, par exemple, dans l'article «Thermal Annealing in Hydrogen for 3-D-Profile Transformation on Silicon-on-Insulator and Sidewall Roughness Reduction» de Ming-Chang M. Lee et al. paru dans la revue Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 15, No. 2, Avril 2006. Il est appliqué sur des pièces de très petites dimensions, par exemple de l'ordre du micron ou moins, dans une atmosphère d'hydrogène à une température de 1050 °C et sous une faible pression d'environ 1333 Pa.

[0014] Sous de telles conditions, il est noté que les arêtes s'arrondissent et que la rugosité des surfaces, aplanies, est réduite, par suite d'un phénomène de migration des atomes de silicium qui quittent les coins convexes (arêtes, sommets des vaguelettes susmentionnées) et s'accumulent dans les coins concaves.

[0015] Comme cela apparaît sur la fig. 2, les angles vifs des jonctions sont arrondis (voir 4') après traitement, et les surfaces des flancs verticaux sont lissées (2'). Par contre, les dimensions globales de la pièce (hauteur et largeur) ne sont pas modifiées par ce traitement.

[0016] Les effets mentionnés, ci-dessus en relation avec l'état de la technique, ont été mis en avant dans le cadre d'applications optiques dans lesquelles le rendement en réflexion des surfaces traitées était amélioré. Ces effets avantageux sont également favorables dans la création de pièces micromécaniques pour mouvement d'horlogerie mécanique de la présente invention, en particulier lorsque ces pièces comprennent des surfaces destinées à être soumises à des contacts avec d'autres pièces du mouvement, comme par exemple la roue d'échappement. Les frottements responsables d'une perte importante de rendement dans le mouvement horloger sont alors réduits.

[0017] Toutefois, les inventeurs ont constaté que ce traitement thermique, qui peut être appliqué à des pièces micromécaniques de dimensions bien supérieures à celles des pièces décrites dans l'état de la technique, entraîne des effets avantageux supplémentaires, notamment un réarrangement du réseau cristallin qui avait été préalablement perturbé par le procédé de gravure. Ce réarrangement du réseau cristallin, joint à la suppression des angles vifs et au lissage des surfaces, contribue largement à l'amélioration des propriétés mécaniques des pièces en silicium. Le résultat obtenu est une réduction notable de la fragilité des pièces en silicium, produites par un procédé de gravure de type RIE ou DRIE et, destinées à des mouvements de montres mécaniques, ainsi que l'augmentation de la résistance aux chocs de ces mêmes pièces.

[0018] Ces caractéristiques sont avantageuses pour toute pièce micromécaniques de dimensions réduites rendant sa manipulation délicate, en particulier lors de l'assemblage d'un mouvement. Elles sont encore plus avantageuses pour des pièces micromécaniques pour mouvement d'horlogerie mécanique dont des surfaces sont soumises à des contacts avec d'autres pièces du mouvement, comme par exemple la roue d'échappement, la fragilité de ces surfaces étant alors réduite. Ces applications profitent également du fait que le traitement thermique permet d'obtenir des états de surfaces d'une rugosité Rms (Root mean square ou moyenne quadratique) réduite, à savoir de l'ordre de quelques nanomètres.

[0019] La durée du traitement thermique doit être ajustée en fonction des dimensions des pièces et/ou de l'effet désiré, notamment suivant la valeur souhaitée pour le rayon de courbure aux jonctions entre surfaces sécantes de la pièce. De manière générale, pour les dimensions habituellement mises en jeu dans les mouvements d'horlogerie mécaniques, la

plupart des pièces micromécaniques présenteront des qualités mécaniques améliorées après un traitement thermique, à une température de l'ordre de 800 °C à 1300 °C et, de durée approximativement comprise de quelques minutes à plusieurs heures. Le traitement thermique peut être appliqué en une ou plusieurs périodes successives sans sortir du cadre de l'invention, sous une pression comprise entre 13,3 Pa et 13,3 kPa (entre 100 mTorr et 100 Torr).

**[0020]** On obtient ainsi des jonctions présentant avantageusement des rayons de courbures compris approximativement entre 0,1% et 20% par rapport à une des dimensions générales de la pièce d'horlogerie correspondante. Pour des pièces présentant une épaisseur notablement inférieure aux autres dimensions, c'est cette épaisseur qui pourra servir de base pour définir la valeur des rayons de courbure concernés.

**[0021]** De manière générale, on peut considérer pour des pièces micromécaniques de dimensions courantes que des rayons de courbures compris entre quelques dixièmes de micromètre et quelques micromètres sont préférables. A titre d'exemple illustratif non limitatif, on pourra prévoir de ménager un rayon de courbure de l'ordre de 1 µm à 2 µm pour les jonctions séparant différentes surfaces d'une roue d'échappement de 5 mm de diamètre et dont l'épaisseur est de 120 µm, le rayon de courbure représentant dans ce cas moins de 2% de l'épaisseur.

**[0022]** L'atmosphère réductrice est constituée, principalement, d'hydrogène mais celui-ci peut être utilisé pur ou en mélange avec de l'Argon ou tout autre gaz neutre.

**[0023]** La description ci-dessus a été faite en référence à un exemple de forme particulière. Il est évident, toutefois, que l'invention peut être utilisée avantageusement pour tout autre type de pièce micromécanique sans sortir de son cadre défini dans les revendications.

## Revendications

1. Pièce micromécanique (1) en silicium, notamment pour mouvement d'horlogerie mécanique, ladite pièce présentant au moins deux surfaces sécantes (2, 3) reliées l'une à l'autre par une jonction, caractérisée en ce que ladite jonction présente la forme d'une arête arrondie (4').
2. Pièce micromécanique (1) selon la revendication 1, caractérisée en ce qu'elle comporte une pluralité de paires de surfaces sécantes (2, 3) reliées l'une à l'autre par une jonction, toutes les jonctions présentant la forme d'une arête arrondie (4').
3. Pièce micromécanique (1) selon la revendication 1 ou 2, caractérisée en ce que ladite ou lesdites jonctions présentent un rayon de courbure de l'ordre de 0,1% à 20% par rapport à une des dimensions générales de la pièce micromécanique, préférablement par rapport à la plus petite des dimensions de ladite pièce micromécanique, plus préférablement de l'ordre de quelques dixièmes de micromètres à quelques micromètres.
4. Pièce micromécanique (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisée en ce que lesdites surfaces présentent une rugosité Rms de l'ordre de quelques nanomètres.
5. Pièce micromécanique (1) selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce qu'elle est une roue, dentée ou non, une roue d'échappement, une ancre, un balancier, une partie de rotor, une pierre, un pare-choc, une aiguille indicatrice, une came, une roue à colonnes, un plateau, une cheville, une levée, un ressort de rappel ou un ressort spiral.
6. Procédé de fabrication d'une pièce micromécanique (1) silicium selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes:
  - gravure de ladite pièce dans un substrat en silicium, celle-ci présentant au moins deux surfaces associées à des plans sécants et reliées l'une à l'autre par une jonction en forme d'arête vive,
  - traitement de recuit de ladite pièce dans une atmosphère réductrice et sous des conditions de température et de pression adaptées pour provoquer la migration d'atomes de silicium à partir desdites arêtes vives de manière à les arrondir.
7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce que ladite atmosphère réductrice comprend de l'hydrogène.
8. Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce que ladite atmosphère réductrice comprend également un gaz neutre, préférablement de l'argon.
9. Procédé selon l'une des revendications 6 à 8, caractérisé en ce que ledit traitement de recuit est effectué à une température comprise entre 800 °C et 1300 °C.
10. Procédé selon l'une des revendications 6 à 9, caractérisé en ce que ledit traitement de recuit est effectué à une pression comprise entre 13,3 Pa et 13,3 kPa.
11. Procédé selon l'une des revendications 6 à 10, caractérisé en ce que ledit traitement de recuit est effectué pendant une durée prédéterminée, ladite durée étant calculée sur une ou plusieurs périodes successives de traitement.

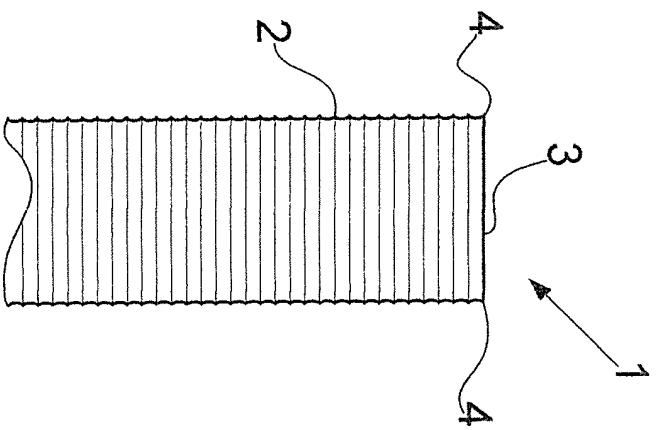


Fig. 1

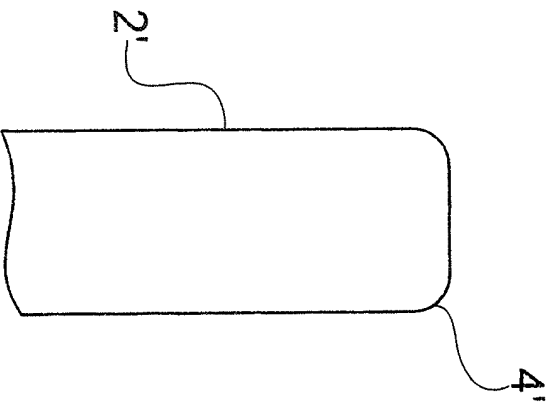


Fig. 2