



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:  
**13.01.2021 Bulletin 2021/02**

(51) Int Cl.:  
**G04B 19/04 (2006.01) G04B 19/12 (2006.01)**  
**G04B 15/14 (2006.01) G04B 17/06 (2006.01)**  
**G04B 13/02 (2006.01) G04D 3/00 (2006.01)**

(21) Numéro de dépôt: **19185364.7**

(22) Date de dépôt: **10.07.2019**

(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**  
 Etats d'extension désignés:  
**BA ME**  
 Etats de validation désignés:  
**KH MA MD TN**

(71) Demandeur: **Patek Philippe SA Genève**  
**1204 Genève (CH)**

(72) Inventeur: **FOURNIER, Rémy**  
**2000 Neuchâtel (CH)**

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

(54) **PROCEDE POUR DEPOLIR PAR ENDOITS UN COMPOSANT HORLOGER EN SILICIUM**

(57) Le procédé pour dépolir par endroit une surface en silicium (4) comporte les étapes suivantes:  
 a) réaliser un masque de gravure ajouré (6) sur la surface en silicium, de manière à ce que les endroits à dépolir soient exposés;  
 b) déposer une couche sacrificielle (8) de résine sur les endroits exposés de la surface et sur le masque de gravure ;  
 c) attaquer la couche de résine sacrificielle par gravure ionique réactive profonde (DRIE) assez longtemps pour transférer des inhomogénéités de la couche sacrificielle sur les endroits à dépolir de la surface en silicium.

Fig.2

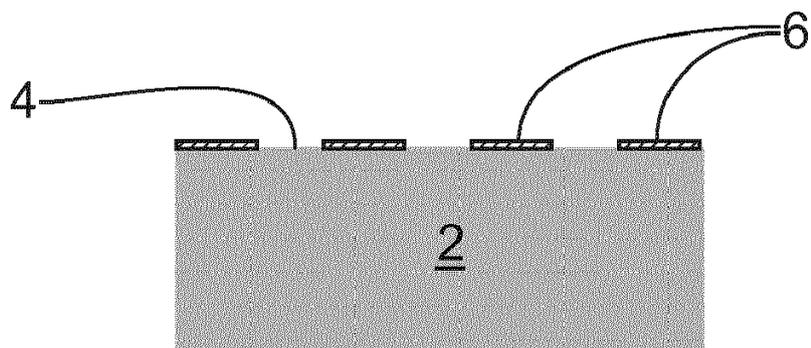


Fig.3

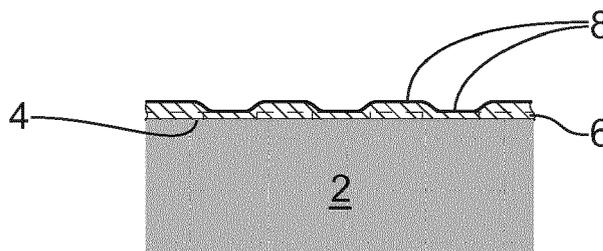
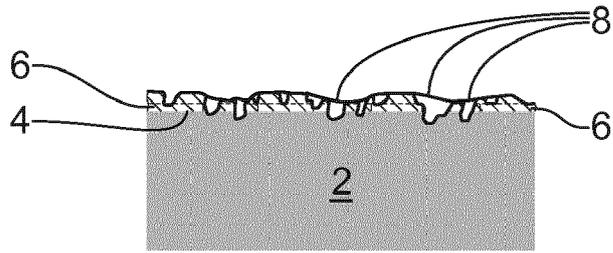


Fig.4



## Description

5 [0001] La présente invention concerne un procédé pour dépolir par endroits une surface en silicium. Elle concerne plus particulièrement un procédé pour dépolir par endroits une surface en silicium d'un wafer dans lequel on va ensuite micro-usiner un composant horloger ou, alternativement, pour dépolir par endroits une surface en silicium du composant horloger lui-même ou de l'ébauche de celui-ci.

10 [0002] Dans le présent document, le verbe « dépolir » a le sens d'attaquer une surface de façon à lui ôter son « poli ». Une surface est ainsi qualifiée de « dépolie » lorsqu'elle présente une rugosité suffisante pour diffuser ou absorber la lumière incidente. Finalement, dans le contexte du présent document, une surface est dite rugueuse lorsqu'elle présente un relief irrégulier comprenant des creux et des pics, ces creux, ou cratères, présentant une profondeur allant d'une centaine de nanomètres à un micromètre.

## ART ANTERIEUR

15 [0003] Reflet à la fois de la mode et de la technique, le monde de l'horlogerie accorde une place toute particulière à l'esthétique. C'est probablement la raison pour laquelle l'emploi de composants décorés y est monnaie courante. On pense en particulier (mais pas exclusivement) aux cadrans de montre, qui sont souvent ornés de gravures. Ces décorations traditionnelles existent dans de nombreuses variétés, ciselage, guillochage, perlage, soleillage, ou encore côtes de Genève, etc.

20 [0004] Aujourd'hui, de plus en plus de composants horlogers sont réalisés en silicium. Or ce matériau possède un grand inconvénient : il est fragile. Si on le soumet à des contraintes qui dépassent une certaine intensité, il se casse sans déformation plastique préalable. En effet, le silicium n'est absolument pas ductile, et on comprendra donc qu'il ne peut pas être gravé en utilisant les techniques traditionnelles des horlogers.

25 [0005] Le silicium cristallin est opaque et réfléchit la lumière. Son aspect est celui d'un métal gris foncé. Cette teinte peut donner une apparence un peu austère aux pièces réalisées en silicium. Dans le but de remédier à cet inconvénient et de donner une apparence un peu plus gaie à ces composants, on a proposé de revêtir leur surface d'une mince couche de dioxyde transparent. En effet, cette couche de dioxyde de silicium est le théâtre de phénomènes d'interférences lumineuses accompagnés de l'apparition de couleurs irisées. Ces dernières ont notamment la particularité d'être dépendantes de l'angle d'observation. Les composants qui présentent de telles surfaces aux reflets arc-en-ciel sont très appréciés. Il n'en reste pas moins qu'un besoin demeure pour l'homme du métier de disposer d'un procédé lui permettant de travailler l'aspect des surfaces des composants horloger en silicium, d'une manière qui permette de conférer à chaque modèle de pièces d'horlogerie une personnalité proprement unique.

## BREF EXPOSE DE L'INVENTION

35 [0006] Un but de la présente invention est de remédier aux problèmes de l'art antérieur qui viennent d'être expliqués. La présente invention atteint ce but ainsi que d'autres en fournissant un procédé pour dépolir par endroits une surface en silicium, qui est conforme à la revendication 1 annexée.

40 [0007] Conformément à l'étape (a) du procédé de l'invention, on délimite d'abord les endroits de la surface en silicium qui seront dépolis en réalisant un masque de gravure comportant des ouvertures.

[0008] Conformément à l'étape (b) du procédé de l'invention, on dépose une couche sacrificielle de résine sur le masque de gravure et à l'intérieur de ses ouvertures. Conformément à l'invention, la réalisation de la couche sacrificielle ne fait intervenir, ni exposition, ni recuit de la résine de la couche sacrificielle. Un avantage de cette particularité est qu'elle contribue à raccourcir et à simplifier la mise en oeuvre de l'étape (b) du procédé.

45 [0009] Conformément à l'étape (c) du procédé de l'invention, on attaque ensuite la couche de résine sacrificielle par gravure ionique réactive profonde (habituellement désignée par son acronyme anglais « DRIE »), de manière à transférer des inhomogénéités de la couche sacrificielle sur les endroits à dépolir de la surface en silicium. La gravure ionique réactive profonde est la technique de gravure la plus utilisée pour le micro-usinage de composants à base de silicium. Cette technique est déjà décrite notamment dans le document de brevet WO 94/14187 au nom de Robert Bosch GmbH. Ce document est incorporé par référence dans la présente description. La gravure ionique réactive profonde permet de graver des profils à flancs quasiment verticaux dans un substrat à base de silicium en appliquant une procédure qui fait 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 appelle 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 bombardent 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. On comprendra de ce qui précède que la gravure ionique réactive

profonde, qui intervient à l'étape (c) du procédé de l'invention, se distingue des autres procédés de gravure courants par son caractère hautement anisotrope, quasiment unidirectionnel. Un avantage du recours à la technique de gravure ionique réactive profonde est donc qu'elle permet de transférer au substrat les inhomogénéités de la couche sacrificielle avec une résolution élevée et sans atténuation. Il est important de noter qu'on ne retrouve pas cet avantage avec les autres techniques courantes qui ont un degré d'anisotropie moindre. En effet, avec ces techniques moins anisotropes, la divergence considérable qui existe entre les directions de gravure permet uniquement le transfert d'une rugosité fortement atténuée sur la surface en silicium.

**[0010]** Comme on va le voir plus en détail ci-après, les différents modes de mise en oeuvre de l'invention permettent de dépolir par endroit, de façons identiques ou différentes, la surface d'un wafer en silicium dans lequel on va ensuite micro-usiner un composant horloger ou, alternativement, de dépolir par endroit une surface, ou plusieurs surfaces, du dit composant horloger lui-même ou de l'ébauche de celui-ci. On notera que le wafer, le composant horloger, ou son ébauche, peut avoir été préalablement recouvert ou non d'une couche de SiO<sub>2</sub>. L'invention permet d'associer sur une même plaque, ébauche ou composant, deux effets différents, tel que mat et brillant ou poli et dépoli, ce qui offre de nouvelles possibilités dans l'habillage.

**[0011]** De manière avantageuse, les surfaces dépolies par endroits correspondent à des surfaces visibles de l'extérieur de la pièce d'horlogerie. Les surfaces dépolies sont en outre de préférence situées dans des zones non fonctionnelles des composants horlogers, afin de ne pas interférer avec les mécanismes horlogers et maintenir des propriétés mécaniques optimales.

## BRÈVE DESCRIPTION DES FIGURES

**[0012]** 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 :

- les figures 1 à 5 sont des vues schématiques en coupe verticale qui constituent cinq instantanés successifs au cours de la mise en oeuvre d'un procédé pour dépolir par endroit une surface en silicium, qui est conforme à un premier mode de mise oeuvre particulier de de l'invention ;
- les figures 6 à 11 sont des vues schématiques en coupe verticale qui constituent six instantanés successifs au cours de la mise en oeuvre d'un procédé pour dépolir par endroit une surface en silicium, qui est conforme à un deuxième mode de mise oeuvre particulier de de l'invention ;
- la figure 12 est une vue photographique montrant la face supérieure d'un wafer en silicium dont la surface a été dépolie par endroits en appliquant l'un ou l'autre des deux modes de mise en oeuvre particuliers de l'invention qui font respectivement l'objet des figures 1 à 5 et 6 à 11 ;
- les figures 13 et 14 sont deux vues schématiques en coupe verticale qui constituent deux instantanés au cours de la réalisation de composants horloger par micro-usinage d'un wafer en silicium dont la surface a préalablement été dépolie par endroits à l'aide de l'un ou l'autre des deux modes de mise en oeuvre particuliers de l'invention qui font respectivement l'objet des figures 1 à 5 et 6 à 11 ;
- les figures 15 et 16 sont deux vues au microscope d'un spiral à base de silicium dont la surface a été dépolie par endroits en appliquant un troisième mode de mise en oeuvre particulier de l'invention, ce dernier faisant l'objet des figures 20 à 23 ;
- les figures 17 à 19 sont des vues schématiques en coupe verticale qui constituent trois instantanés successifs montrant la réalisation de l'ébauche d'un composant horloger en silicium par micro-usinage d'un wafer SOI ;
- les figures 20 à 23 sont des vues schématiques en coupe verticale qui constituent quatre instantanés successifs au cours de la mise en oeuvre d'un procédé pour dépolir par endroit une surface en silicium, qui est conforme à un troisième mode de mise oeuvre particulier de de l'invention.

## DESCRIPTION DETAILLÉE DE MODES DE MISE EN ŒUVRE

**[0013]** On va maintenant décrire un premier mode exemplaire de mise en oeuvre du procédé de l'invention en faisant référence aux figures 1 à 5 annexées qui sont cinq vues schématiques en coupe verticale qui illustrent des instants successifs de la mise en oeuvre. La Figure 1 illustre un objet (référéncé 2) qui comporte au moins une surface en silicium 4 que l'on désire dépolir par endroits à l'aide du procédé de l'invention. Conformément à l'exemple illustré, le terme « objet » désigne un wafer de silicium. On comprendra toutefois que conformément à d'autres variantes (non illustrées), ce terme pourrait alternativement désigner un composant horloger à base de silicium ou l'ébauche d'un tel composant.

**[0014]** La figure 2 illustre l'objet 2 suite à la réalisation par photolithographie d'un masque de gravure ajouré 6 sur la surface en silicium 4. Ce masque 6 peut être réalisé de toute manière connue de l'homme du métier. Notamment en déposant d'abord une couche de résine photosensible sur la surface 4, et en structurant ensuite cette couche par photolithographie avant de lui faire subir un recuit. Dans le présent exemple, la couche de résine photosensible est une

## EP 3 764 169 A1

couche de AZ® 9260 dont l'épaisseur est d'environ 7 microns. On comprendra toutefois que la résine peut naturellement être d'un autre type. De plus, son épaisseur n'est bien évidemment pas nécessairement de 7 microns. L'épaisseur de la couche de résine est typiquement, mais pas nécessairement, comprise entre 5 et 15 microns.

5 [0015] La figure 3 illustre l'objet 2 suite au dépôt d'une couche sacrificielle 8 de résine sur le masque de gravure 6 et sur les parties de la surface 4 qui sont exposées à travers les ouvertures du masque 6. La couche sacrificielle de résine présente généralement une épaisseur inférieure ou égale à 5 microns, typiquement inférieure ou égale à 3 microns. Dans le présent exemple, la couche sacrificielle 8 est réalisée avec de la résine photosensible positive du type AZ® 1518. Cette résine particulière est adaptée pour réaliser des couches minces. À titre d'exemple, la résine peut être appliquée à la tournette à 5000 tours/minute. Cette vitesse conduit au dépôt d'une couche mince dont l'épaisseur est 10 d'environ 1,8 micron. Conformément à l'invention, une fois que la résine qui forme la couche sacrificielle 8 a été déposée, on passe à l'étape subséquente de gravure sans avoir insolé ou recuit la couche de résine 8 au préalable.

15 [0016] La figure 4 illustre l'objet 2 après l'étape de gravure susmentionnée. Cette étape de gravure consiste à attaquer la couche de résine sacrificielle 8 par gravure ionique réactive profonde (DRIE). Le tableau I ci-dessous indique les principaux paramètres utilisés dans le présent exemple pour mettre en oeuvre la gravure DRIE.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

Tableau I

	Step	Pression	Puissance	LF Platen	Pulsing	He BP	Gaz		Temp	toop
							Primaire	Secondaire		
	s	mT	W	W	Hz/%	mT	sccm	sccm	°C	nb / min
GR	DEP	1	30	2800/300	70	150/20	0	C4F8-O2/200-50		300
	E1	1	40	2800/600	0	150/20	0	SF6/300	30	
	E2	2.5	40	2800/600	0	150/20	0	SF6-C4F8/300		22.50

**[0017]** Conformément à ce qu'indique le tableau I, la version du procédé DRIE utilisée dans le présent exemple est basée sur un cycle constitué par une étape (désignée par le sigle DEP) de formation d'une couche de passivation, suivie de deux étapes distinctes (respectivement désignées par E1 et E2) de gravure plasma. Pour former la couche de passivation, on injecte un mélange gazeux formé de 4/5 de  $C_4F_8$  et de 1/5 de  $O_2$ . Pour la première étape de gravure E1, on utilise un premier plasma produit à partir de  $SF_6$ . La fonction de ce premier plasma est de désintégrer la partie de la couche de passivation qui se trouve au fond des profils. Quant à la deuxième étape de gravure E2, elle utilise un plasma formé à partir d'un mélange de  $SF_6$  et de  $C_4F_8$ . La fonction de ce deuxième plasma est de creuser les profils par gravure réactive du fond de ces derniers.

**[0018]** L'étape de gravure dont le résultat est illustré dans la figure 4 a pour but de créer des inhomogénéités dans la couche sacrificielle 8 et de transférer ces dernières sur les endroits de la surface en silicium 4 que l'on désire rendre rugueux. Dans le but de maximiser la rugosité de la surface 4 aux endroits à dépolir, on utilise de préférence les paramètres qui figurent dans le tableau I pour la mise en oeuvre la gravure DRIE. Ces paramètres sont différents de ceux qu'on utilise d'habitude pour des applications plus traditionnelles de la gravure ionique réactive profonde. On comprendra toutefois que l'homme du métier peut choisir librement les valeurs des paramètres de gravure, parmi les valeurs qui lui semblent adéquates, sans sortir du cadre de l'invention. Les principales différences entre les valeurs des paramètres qui figurent dans le tableau I et les valeurs qu'on utiliserait normalement pour une gravure DRIE traditionnelle sont énumérées ci-dessous :

- la température du procédé (c.-à-d. la température de l'objet 2) est de 30°C. Autrement dit, elle est supérieure à la température ambiante, alors que la température est normalement comprise entre -10°C et 20°C. Dans ces conditions, la couche sacrificielle 8 cuit de manière inhomogène, jusqu'à ce qu'elle soit consommée totalement ;
- on effectue la gravure sans faire passer de flux d'Hélium au dos de l'objet 2. Autrement dit, on supprime la circulation de gaz sous la plaque support de l'appareil. En effet, ce gaz est susceptible de contribuer au refroidissement de l'objet 2. Dans les applications courantes en revanche, on a l'habitude d'injecter un flux d'hélium à cet endroit sous une pression comprise entre 5mT et 15mT ;
- la valeur indiquée dans la colonne intitulée « LF Platen » correspond à la puissance qui est utilisée pour accélérer les ions dans la direction perpendiculaire à la surface 4. La puissance d'accélération contribue à l'inhomogénéité. Dans le présent exemple, on donne une valeur inhabituellement élevée à cette puissance pendant la phase de passivation (DEP), de l'ordre de 30 à 50 Watts, typiquement 40 Watts. Alors que, dans les applications courantes la puissance est normalement comprise entre 0 et 20 Watts durant la phase DEP et comprise entre 30 et 150 Watts durant les phases E1 et E2.

Les trois différences ci-dessus favorisent une gravure très inhomogène de la résine et permettent ainsi de rendre la surface en silicium particulièrement rugueuse. L'homme du métier comprendra qu'il peut obtenir un degré de rugosité adapté à ses besoins particuliers en faisant varier les paramètres ci-dessus.

**[0019]** Conformément à l'invention, l'étape de gravure DRIE se poursuit assez longtemps pour transférer des inhomogénéités de la couche sacrificielle 8 sur les endroits à dépolir (ou autrement dit rugueux) de la surface en silicium 4. On comprendra donc que la gravure se poursuit au minimum jusqu'à ce que des orifices débouchants aient été créés à travers la couche sacrificielle 8. On peut par exemple repérer ce premier moment charnière par détection de la présence d'atomes de silicium, ou de composés comportant du silicium, dans le réacteur dans lequel la gravure DRIE est mise en oeuvre. À l'autre extrême, la gravure ne devrait pas être poursuivie après que la couche sacrificielle 8 a été totalement consommée. On comprendra que ce second moment charnière est concomitant avec la disparition des espèces chimiques caractéristiques de la couche sacrificielle, qui étaient présentes jusque-là dans le réacteur. Après étalonnage du procédé, l'homme du métier pourra déterminer, par exemple par chronométrage, le moment où il souhaite arrêter la gravure. Le moment que l'homme du métier choisira pour l'arrêt de la gravure sera situé dans l'intervalle entre les premier et second moments charnières susmentionnés.

**[0020]** Enfin, la figure 5 illustre l'objet 2 suite à une dernière étape consistant à éliminer le masque de gravure 6, les résidus de résine de la couche sacrificielle 8, ainsi que d'autres résidus laissés par les étapes de passivation. Dans le présent exemple, le retrait de la résine et des résidus  $C_4F_8$ , est réalisé à l'aide d'un plasma  $O_2$ .

**[0021]** On va maintenant décrire un deuxième mode exemplaire de mise en oeuvre du procédé de l'invention en faisant référence aux figures 6 à 11 annexées qui sont des vues schématiques en coupe verticale montrant six instants successifs de cette mise en oeuvre particulière. Conformément à ce deuxième mode de mise en oeuvre, la surface en silicium que l'on désire dépolir par application du procédé est la surface d'un wafer (référéncé 12). On comprendra toutefois que conformément à d'autres variantes (non illustrées) de ce deuxième mode de mise en oeuvre, la surface en question pourrait être celle d'un composant horloger à base de silicium ou celle de l'ébauche d'un tel composant.

**[0022]** En se référant plus particulièrement aux figures 6 à 10, on peut voir que, conformément à une pratique répandue, le corps en silicium du wafer 12 est revêtu sur tous les côtés par une couche de dioxyde de silicium ( $SiO_2$ ) 15 dont l'épaisseur est d'environ 0.8 micron. De manière connue en soi, la couche 15 peut par exemple avoir été formée sur le

wafer 12 par oxydation thermique du silicium à une température comprise entre 900°C et 1200°C.

**[0023]** La figure 6 illustre le wafer 12 après une première étape consistant en la réalisation par photolithographie d'un masque de gravure ajouré 16 sur la face supérieure du wafer 12. Dans le présent exemple, le masque de gravure est un masque en résine, et il peut être réalisé de façon classique, par exemple avec de la résine photosensible du type AZ® 1518. La résine peut être appliquée à la tournette à 4000 tours/minute de manière à déposer une couche dont l'épaisseur est d'environ 2,6 microns. On structure ensuite la couche de résine déposée par photolithographie avant de lui faire subir un recuit.

**[0024]** L'étape dont le résultat est illustré dans la figure 7 consiste à graver la couche de SiO<sub>2</sub> à travers les ouvertures du masque de résine 16, de manière à la structurer et à en faire un masque de gravure. Conformément au présent exemple, on utilise la gravure ionique réactive (RIE) pour éliminer entièrement le dioxyde là où il est exposé, de manière à faire apparaître le silicium à tous les endroits où il doit être dépoli.

**[0025]** La figure 8 illustre le wafer 12 après le retrait du masque de résine 16. Ce retrait peut être effectué de multiples manières connues de l'homme du métier, et on comprendra en outre qu'il pourrait tout aussi bien survenir plus tard dans le procédé. La couche d'oxyde 15 qui avait été structurée lors de l'étape précédente se trouve maintenant en position de servir de masque de gravure capable de résister au processus DRIE qui va être mis en oeuvre lors d'une étape ultérieure. La figure 8 montre encore une nouvelle couche sacrificielle (référéncée 18) qui recouvre le masque de gravure 15 en SiO<sub>2</sub>, ainsi que le silicium exposé à travers les ouvertures du masque 15. Comme déjà expliqué en relation avec la figure 3, la couche sacrificielle 18 peut être réalisée avec de la résine type AZ® 1518. Comme dans le cas de l'exemple précédent, la résine peut être appliquée à la tournette à 5000 tours/minute, de manière à former une couche mince dont l'épaisseur est d'environ 1,8 micron.

**[0026]** L'étape de gravure dont le résultat est illustré dans la figure 9 a pour but de créer des inhomogénéités dans la couche sacrificielle 18 et de transférer ces dernières sur les endroits de la surface en silicium que l'on désire rendre rugueux. Cette étape peut être mise en oeuvre de façon identique à ce qui a déjà été expliqué ci-dessus en relation avec la figure 4 du premier exemple. Conformément à l'invention, l'étape de gravure DRIE se poursuit assez longtemps pour transférer des inhomogénéités de la couche sacrificielle 18 sur les endroits à dépolir de la surface en silicium, de façon à ce que lesdits endroits soient rendus rugueux selon le degré de dépolissage souhaité.

**[0027]** La figure 10 illustre le wafer 12 après que les résidus de résine de la couche sacrificielle 18 et les résidus de C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> laissés par les étapes de passivation aient été éliminés. Comme dans le premier exemple, l'élimination des résidus peut être réalisée à l'aide d'un plasma O<sub>2</sub>. Enfin, l'étape du procédé dont le résultat est illustré dans la figure 11 consiste en l'élimination de tout le SiO<sub>2</sub> qui recouvre le wafer 12. De façon connue ne soi, cette étape peut être mise en oeuvre sous forme d'une gravure humide au BHF.

**[0028]** La figure 12 est une vue photographique montrant la face supérieure d'un wafer en silicium dont la surface a été dépolie par endroits en appliquant l'un ou l'autre des deux modes de mise en oeuvre exemplaire de l'invention qui ont été décrits jusqu'ici. Les endroits de la surface en silicium qui ont été dépolis par le procédé sont parfaitement visibles dans la photographie. Un examen de la figure 12 permet de se faire une idée des innombrables possibilités graphiques qu'offre le procédé de l'invention pour conférer à des composants de horlogers (p.ex., spiraux, aiguilles, ancrs, roues, cadrans, etc.) une personnalité visuellement unique.

**[0029]** Les figures 13 et 14 sont deux vues schématiques en coupe verticale qui illustrent deux instants au cours de la réalisation de composants horloger par micro-usinage à partir d'un wafer en silicium dont la surface a préalablement été dépolie par endroits à l'aide du procédé de l'invention. A titre d'exemple, la figure 13 illustre le wafer 12 dont la surface en silicium a précédemment été dépolie par endroits conformément au deuxième mode de mise en oeuvre qui a été décrit ci-dessus. La figure 13 illustre le wafer 12 suite à la formation d'un nouveau masque de gravure ajouré 20 sur sa face supérieure. Ce nouveau masque 20 peut être réalisé de manière classique, par exemple en déposant d'abord une couche d'environ 7 microns d'épaisseur de résine photosensible du AZ® 9260. Une fois cette couche de résine photosensible structurée et recuite, le masque de gravure 20 doit être capable de résister au processus DRIE qui sera mis en oeuvre lors d'une étape ultérieure. La figure 14 montre le wafer 12 après la mise en oeuvre de la gravure DRIE pour découper le wafer 12 en plusieurs morceaux. Il vaut la peine de préciser que le découpage d'un wafer par gravure DRIE est déjà connu en tant que tel. On utilise d'ailleurs de préférence des réglages traditionnels pour la mise en oeuvre de cette gravure. On comprendra que certains au moins des morceaux représentés de façon schématique dans la figure 14, sont en fait des composants horlogers ou du moins des ébauches de tels composants.

**[0030]** Comme on l'a vu, les figures 13 et 14 décrivent la gravure d'une face d'un wafer par DRIE après que la surface de ce dernier ait été dépolie par endroit à l'aide du procédé de l'invention. On va maintenant décrire un mode de mise en oeuvre de l'invention dans lequel, à l'inverse, on découpe d'abord au moins une ébauche de composant horloger (en l'occurrence l'ébauche d'un spiral) dans un wafer avant de dépolir par endroits la surface du composant. Ce troisième mode exemplaire de mise en oeuvre du procédé de l'invention sera décrit en faisant référence aux figures 20 à 23 annexées, qui sont des vues schématiques en coupe verticale qui illustrent l'ébauche d'un composant horloger en silicium à quatre instants successifs de la mise en oeuvre d'un procédé.

**[0031]** Les figures 17 à 19 sont des vues schématiques en coupe verticale qui constituent trois instantanés successifs

montrant la réalisation de l'ébauche d'un composant horloger en silicium à partir d'un wafer SOI. La figure 17 illustre le wafer SOI (silicium sur isolant) référencé 22. De façon conventionnelle, ce wafer est constitué de deux couches de silicium et d'une couche de dioxyde de silicium prise en sandwich entre les couches de silicium. La figure 17 illustre le wafer 22 suite à la réalisation d'un masque de gravure ajouré 26 par photolithographie sur la face supérieure du wafer 22. Le masque 26 peut être réalisé de manière classique. Par exemple, en procédant de la manière décrite plus haut en relation avec la figure 13.

**[0032]** La figure 18 illustre le wafer SOI 22 après que la couche de silicium supérieure ait été gravée sur toute son épaisseur (environ 120 microns) par gravure DRIE conventionnelle.

**[0033]** La figure 19 illustre le wafer SOI 22 après le retrait du masque de gravure 26. De façon connue, la dissolution du masque 26 peut être obtenue par exemple en immergeant le wafer SOI 22 durant quelques heures dans une solution de KOH. La figure 19 montre encore qu'une couche de dioxyde de silicium 24 recouvre entièrement les surfaces du wafer SOI 22 et de l'ébauche de composant horloger qui est formée dans sa couche de silicium supérieure. L'épaisseur de la couche de SiO<sub>2</sub> est d'environ 0.8 micron. On comprendra que la couche de dioxyde 24 a été formée après le retrait du masque de gravure 26. Comme déjà indiqué en relation avec les figures 6 à 10, la couche de dioxyde peut avoir été formée sur le wafer 22, par exemple, par oxydation thermique à une température comprise entre 900°C et 1200°C.

**[0034]** Les figures 20 à 23 sont des vues schématiques en coupe verticale illustrant quatre instants successifs du troisième mode exemplaire de mise oeuvre particulier de de l'invention. Comme déjà mentionné, ce troisième mode de réalisation permet de dépolir par endroits la surface d'un composant horloger ou de l'ébauche d'un tel composant ; le composant ou l'ébauche ayant d'abord été découpé dans un wafer. Conformément au présent exemple, le procédé est mis en oeuvre pour dépolir au moins par endroits l'ébauche de composant horloger dont la réalisation par micro-usinage du wafer SOI (référéncé 22) vient d'être décrite en relation avec les figures 17 à 19. La figure 20 illustre le wafer SOI 22, ainsi que l'ébauche de composant horloger qui est formée dans la couche de supérieure de ce dernier, après qu'on ait enlevé la partie de la couche 24 de dioxyde de silicium qui recouvrait la face supérieure de l'ébauche. Dans le présent exemple, on a utilisé la gravure ionique réactive directionnelle (RIE directionnelle) de façon à enlever le dioxyde de silicium uniquement sur la face supérieure.

**[0035]** La figure suivante (la figure 21) illustre le wafer SOI 22 après le dépôt d'une couche de résine photosensible 28 recouvrant complètement l'ébauche. A l'instar de ce qui a déjà été expliqué en relation avec la figure 6, la résine peut être par exemple du type AZ® 1518. Elle peut être appliquée à la tournette à la vitesse de 4000 tours/minute de manière que l'épaisseur de la couche 28 soit d'environ 2,6 microns.

**[0036]** La figure 22 illustre le wafer SOI 22 après la réalisation d'un masque ajouré par structuration de la couche de résine 28. Conformément au présent exemple, la structuration de la couche 28 est réalisée par photolithographie en mettant en oeuvre la gravure RIE. On comprendra que les ouvertures du masque sont agencées de manière à exposer uniquement les surfaces à dépolir. La figure 22 montre encore une couche sacrificielle 30 qui a été déposée ensuite sur la couche de résine 28 et dans les ouvertures de cette dernière. Conformément à ce qui a déjà été expliqué en relation avec la figure 3, la couche sacrificielle 30 peut par exemple être réalisée en appliquant de la résine photosensible du type AZ® 1518 à la tournette à 5000 tours/minute.

**[0037]** La figure 23 illustre le wafer SOI 22, ainsi que l'ébauche de composant horloger qui est formée dans la couche de supérieure de ce dernier, après le transfert par gravure DRIE d'inhomogénéités de la couche sacrificielle 30 sur les endroits à dépolir de l'ébauche. La figure 23 montre encore que les résidus de résine du masque ajouré 28 et de la couche sacrificielle 30, ainsi que les résidus de C4F8 laissés par les étapes de passivation ont été éliminés. La figure 23 montre enfin que le SiO<sub>2</sub> qui recouvrait les faces latérales de l'ébauche a également été éliminé.

**[0038]** L'ébauche de composant horloger peut enfin être détachée du restant du wafer SOI 22. A cet effet, on immerge le wafer SOI et l'ébauche dans un bain qui contient un agent chimique qui attaque le dioxyde de silicium tout en épargnant le silicium. On utilise de préférence de l'acide fluorhydrique tamponné (BHF).

**[0039]** 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.

## Revendications

1. Procédé pour dépolir par endroit une surface en silicium (4), le procédé comportant les étapes suivantes:

- a) réaliser un masque de gravure ajouré (6 ; 15 ; 28) sur la surface en silicium, de manière à ce que les endroits à dépolir de la surface soient exposés;
- b) déposer une couche sacrificielle (8 ; 18 ; 30) de résine sur les endroits exposés de la surface et sur le masque de gravure, la couche sacrificielle étant réalisée sans exposition de la résine, ni recuit;
- c) attaquer la couche de résine sacrificielle par gravure ionique réactive profonde (DRIE), continuer l'étape c)

## EP 3 764 169 A1

assez longtemps pour transférer des inhomogénéités de la couche sacrificielle sur l'étendue à dépolir de la surface en silicium, de façon à ce que ladite étendue soit rendue rugueuse.

- 5
2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** l'étape (c) est mise en oeuvre en laissant la température (Temp) de la surface en silicium s'élever au-dessus de la température ambiante.
3. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** l'étape (c) est mise en oeuvre en laissant la température (Temp) de la surface en silicium s'élever au-dessus de 30°C.
- 10
4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1, 2 et 3, **caractérisé en ce que** l'étape (c) est mise en oeuvre en laissant la température (Temp) de la surface du silicium s'élever au point que la couche sacrificielle (8 ; 18 ; 30) cuit de manière inhomogène, jusqu'à ce qu'elle soit consommée totalement.
- 15
5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'étape (c) est mise en oeuvre en fournissant une puissance (LF Platen) supérieure à 40 Watts pour accélérer les ions dans la direction perpendiculaire à la surface en silicium durant les étapes de passivations (DEP).
- 20
6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'étape (c) comporte les sous-étapes suivantes :
- 25
- i. attaquer par gravure ionique réactive la couche sacrificielle (8 ; 18 ; 30) et/ou la surface en silicium à travers les ajours du masque (6 ; 15 ; 28), de manière à creuser dans la couche sacrificielle et/ou la surface en silicium ;
- ii. déposer un couche de passivation chimiquement inerte sur les surfaces exposées par la gravure durant l'étape précédente ;
- 30
- iii. attaquer par gravure ionique réactive la couche de passivation à travers les ajours du masque, de manière à exposer la couche sacrificielle et/ou la surface en silicium au fond des creux approfondis durant la sous-étape (i) précédente ;
- iv. répéter l'exécution d'une séquence de sous-étapes comprenant les étapes (i), (ii) et (iii) jusqu'à la fin de l'étape (c).
- 35
7. Composant horloger comportant une surface en silicium, ladite surface ayant été dépolie par endroit à l'aide du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6.
- 40
- 45
- 50
- 55

Fig.1

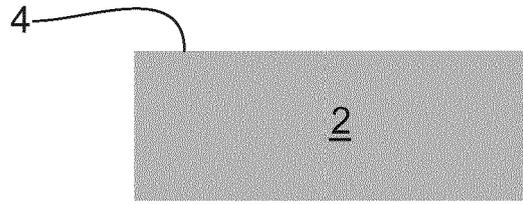


Fig.2

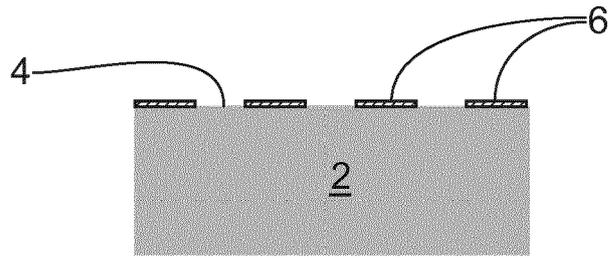


Fig.3

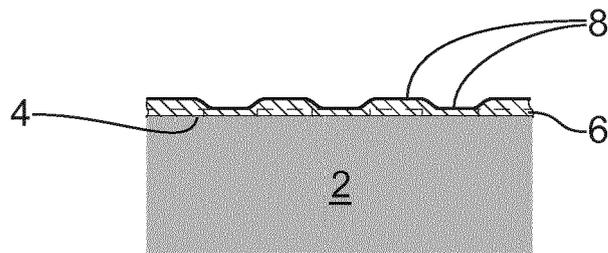


Fig.4

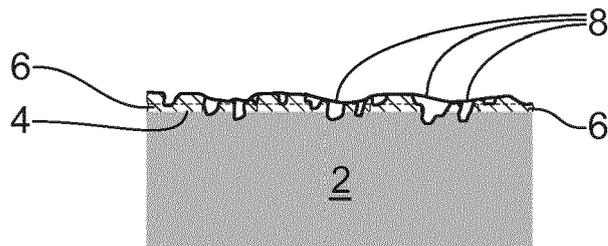


Fig.5

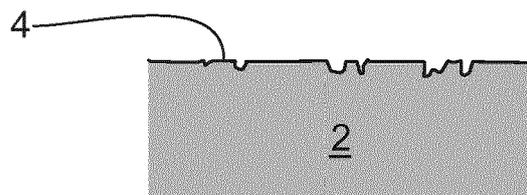


Fig.6

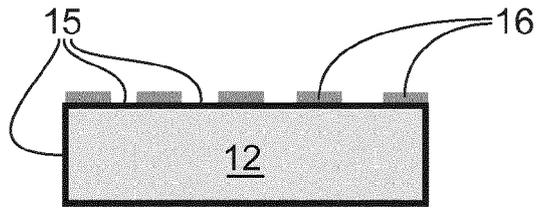


Fig.7

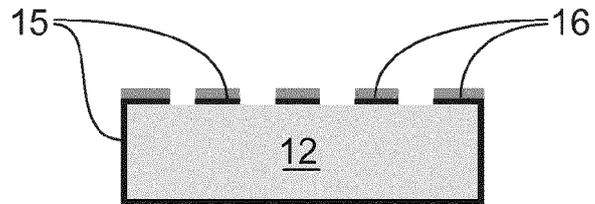


Fig.8

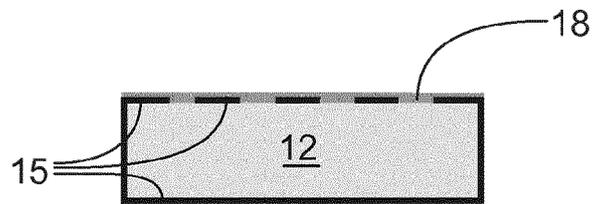


Fig.9

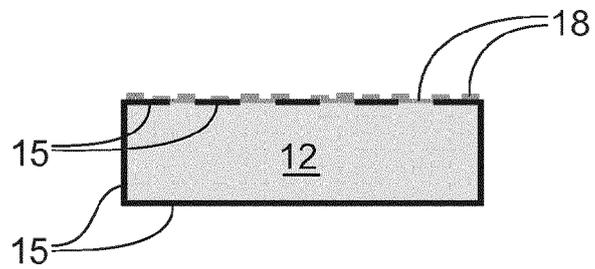


Fig.10

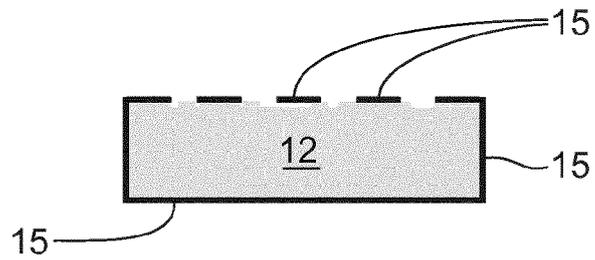


Fig.11



Fig.12

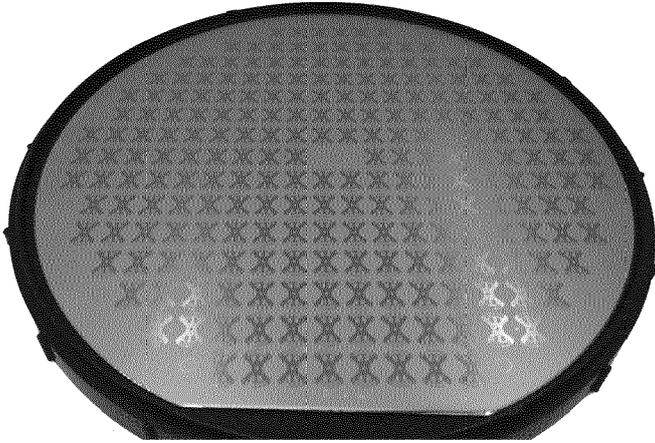


Fig.15

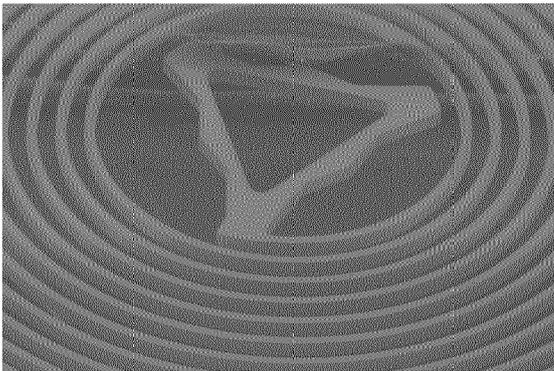


Fig.13

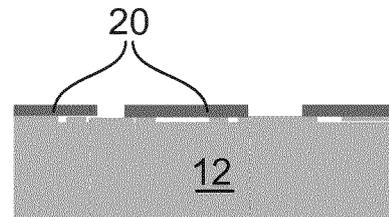


Fig.16

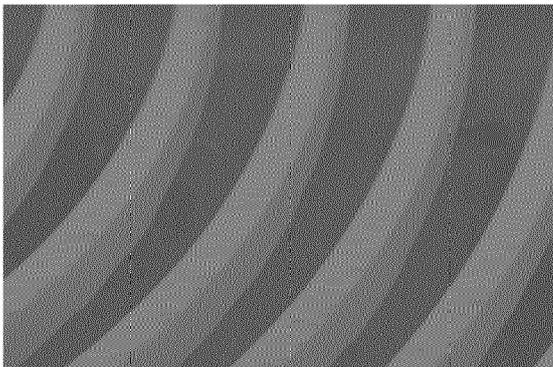


Fig.14

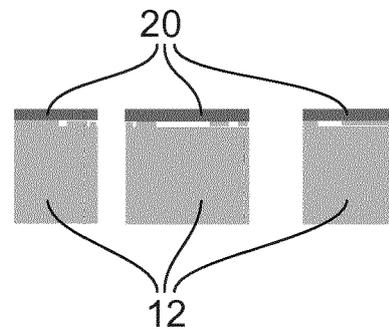


Fig.17

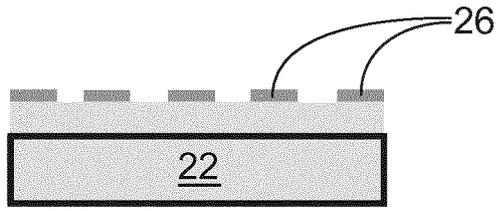


Fig.18

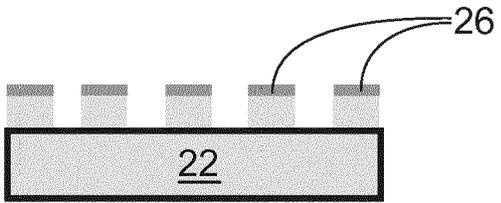


Fig.19

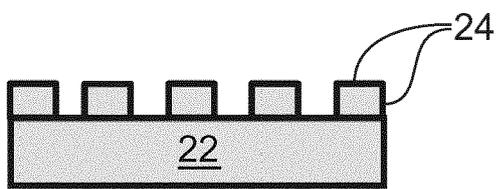


Fig.20

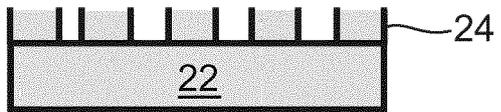


Fig.21

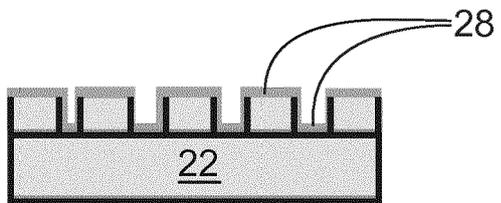


Fig.22

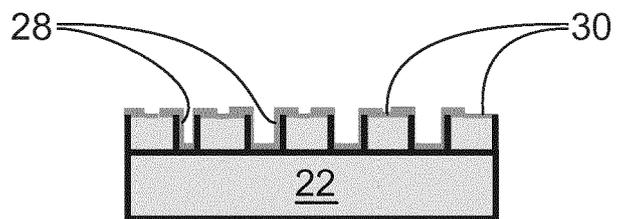
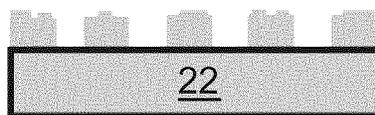


Fig.23





## RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 19 18 5364

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
A	EP 3 109 199 A1 (NIVAROX-FAR S A [CH]) 28 décembre 2016 (2016-12-28) * alinéas [0003], [0008], [0058]; revendication 14 *	1-7	INV. G04B19/04 G04B19/12 G04B15/14 G04B17/06 G04B13/02 G04D3/00
A	EP 3 002 635 A1 (RICHEMONT INT SA [CH]) 6 avril 2016 (2016-04-06) * alinéa [0023]; figures 1-4 *	1-7	
A	EP 3 192 645 A1 (COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES [FR]) 19 juillet 2017 (2017-07-19) * alinéas [0042], [0045], [0046], [0079] *	1-7	
A	FR 2 901 635 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 30 novembre 2007 (2007-11-30) * page 12, ligne 27 - page 16, ligne 25 *	1-7	
A	CH 708 827 A2 (NIVAROX SA [CH]) 15 mai 2015 (2015-05-15) * alinéas [0022], [0024]; revendication 18 *	1-7	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
A	EP 2 856 903 A1 (RADO MONTRES SA [CH]) 8 avril 2015 (2015-04-08) * alinéas [0029] - [0030] *	1-7	G04B G04D G02B B29D H01L B21C
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
La Haye		18 décembre 2019	Sigrist, Marion
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES			
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

EPO FORM 1503 03 82 (P04C02)

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.

EP 19 18 5364

5 La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.  
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du  
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

18-12-2019

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 3109199 A1	28-12-2016	CN 106276779 A	04-01-2017
		EP 3109199 A1	28-12-2016
		JP 6381586 B2	29-08-2018
		JP 2017007086 A	12-01-2017
		RU 2016125516 A	26-12-2017
		TW 201712745 A	01-04-2017
		US 2016378064 A1	29-12-2016
EP 3002635 A1	06-04-2016	AUCUN	
EP 3192645 A1	19-07-2017	EP 3192645 A1	19-07-2017
		FR 3046682 A1	14-07-2017
		US 2017197338 A1	13-07-2017
FR 2901635 A1	30-11-2007	AUCUN	
CH 708827 A2	15-05-2015	CH 708827 A2	15-05-2015
		CN 105705458 A	22-06-2016
		CN 109856948 A	07-06-2019
		EP 3066044 A1	14-09-2016
		HK 1225710 A1	15-09-2017
		JP 6170621 B2	26-07-2017
		JP 2016537209 A	01-12-2016
		RU 2016122531 A	14-12-2017
		US 2016251215 A1	01-09-2016
		US 2019023564 A1	24-01-2019
WO 2015067419 A1	14-05-2015		
EP 2856903 A1	08-04-2015	CH 708654 A2	15-04-2015
		CN 104516256 A	15-04-2015
		EP 2856903 A1	08-04-2015
		HK 1209500 A1	01-04-2016
		JP 2015072270 A	16-04-2015
		KR 20150039102 A	09-04-2015
		RU 2014139613 A	20-04-2016
		US 2015092524 A1	02-04-2015

EPO FORM P0480

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

**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**

- WO 9414187 A [0009]