

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
COURBEVOIE

11 N° de publication : 3 039 292

(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

21 N° d'enregistrement national : 15 57061

51 Int Cl<sup>8</sup> : G 04 B 17/08 (2017.01), G 04 D 3/00, 7/10

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 24.07.15.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la  
demande : 27.01.17 Bulletin 17/04.

56 Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du  
présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATO-  
MIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablis-  
sment public — FR et ARNANO Société par actions  
simplifiée — FR.

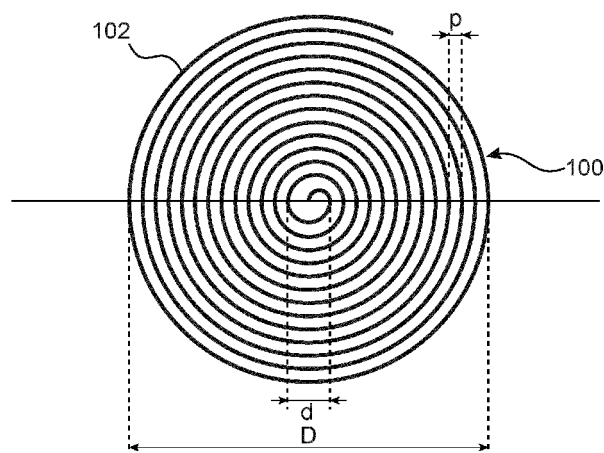
72 Inventeur(s) : AUBERT JEAN-JACQUES, SALVE-  
TAT THIERRY et REY ALAIN-MARCEL.

73 Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATO-  
MIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablis-  
sment public, ARNANO Société par actions simplifiée.

74 Mandataire(s) : BREVALEX Société à responsabilité  
limitée.

54 RESSORT SPIRAL ET PROCEDE DE REALISATION DU RESSORT SPIRAL.

57 Ressort spiral (100) apte à être couplé mécaniquement à un balancier, comprenant au moins une lame (102) enroulée en forme de spirale, la lame (102) comprenant au moins l'un des matériaux suivants: grenat d'aluminate de terre rare, alexandrite, langasite, langatate, spinelle, saphir, fluorine, YLF.



FR 3 039 292 - A1



## RESSORT SPIRAL ET PROCEDE DE REALISATION DU RESSORT SPIRAL

### DESCRIPTION

#### DOMAINE TECHNIQUE ET ART ANTERIEUR

5 L'invention concerne le domaine de l'horlogerie, et plus particulièrement un ressort spiral, ou spiral, destiné à être couplé mécaniquement à un balancier, également appelé balancier spiral, pour former un oscillateur mécanique correspondant à l'organe régulateur d'un mouvement d'horlogerie.

10 Les composants de précision pour l'industrie horlogère, dont le ressort spiral, sont généralement réalisés dans des alliages métalliques spéciaux amagnétiques à faible coefficient de dilatation ou compensés en variation thermique par une conception particulière.

15 Ces composants peuvent également être réalisés en silicium micro-usinés par gravure ionique réactive profonde, ou DRIE (« Deep Reactive Ion Etching »). Une telle gravure permet d'usiner le silicium en trois dimensions avec une précision de l'ordre du millième de millimètre. Les pièces produites par ce biais présentent donc toutes exactement les mêmes qualités les unes par rapport aux autres, qu'il s'agisse de la forme ou du poids. Elles possèdent par ailleurs des surfaces parfaitement lisses. On obtient ainsi des composants de haute précision rigoureusement identiques, ce qui permet notamment  
20 d'augmenter les performances du mouvement réalisé avec ces composants.

Le silicium est un matériau intéressant pour la réalisation de composants de précision d'horlogerie car il présente un faible coefficient de dilatation thermique (de l'ordre de  $2,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), tout comme l'Invar<sup>®</sup>, très utilisé en horlogerie.

25 Parmi les composants de précision de l'horlogerie, l'un des plus importants est l'organe régulateur des montres mécaniques correspondant à un oscillateur mécanique composé d'un volant d'inertie, appelé balancier, et d'un ressort en forme de spirale, appelé spiral ou ressort spiral, dont une première extrémité est fixée sur l'axe du balancier et dont l'autre extrémité est fixée sur un pont, appelé coq, dans lequel pivote l'axe du balancier.

En fonctionnement, le balancier oscille autour de sa position d'équilibre (ou point mort). Lorsque le balancier quitte cette position, il arme le ressort spiral. Cela crée un couple de rappel qui, lorsque le balancier est libéré, le fait revenir à sa position d'équilibre. Comme le balancier a acquis une certaine vitesse, donc une certaine énergie cinétique, il dépasse son point mort jusqu'à ce que le couple contraire du ressort spiral l'arrête et l'oblige à tourner dans l'autre sens. Ainsi, le ressort spiral régule la période d'oscillation du balancier autour de son axe.

Le ressort spiral équipant les mouvements de montres mécaniques est par exemple formé d'une lame métallique élastique de section rectangulaire enroulée sur elle-même en formant une spirale d'Archimède et comportant entre 11 et 15 tours, ou spires. Le ressort spiral est principalement caractérisé par son couple de rappel dont la valeur dépend du module d'Young du matériau de la lame, de l'épaisseur du ressort spiral, de la largeur du ressort spiral, de la longueur du ressort spiral, et de l'angle de torsion.

La constante de rappel ou rigidité d'un ressort spiral, qui caractérise le couple de rappel par unité d'angle de torsion, doit être la plus stable possible, quels que soient la température et le champ magnétique auxquels le ressort spiral est soumis.

Afin d'améliorer la qualité de ce composant, il serait avantageux que celui-ci ait une plage de température de fonctionnement comprise entre environ 10°C et 50°C, et que le module d'Young du matériau utilisé soit supérieur à environ 200 GPa, par exemple compris entre 200 et 250 GPa. Or, le silicium a un module d'Young de l'ordre de 170 GPa.

De plus, le matériau utilisé doit être disponible sous la forme de plaque pour la fabrication collective de ces composants, et surtout usinable par des méthodes micro-technologies telles que celles issues de la microélectronique.

Les verres et vitrocéramiques par exemple de type ZERODUR® ou PYREX® présentent des dilatations thermiques faibles ( $0,05 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  pour le ZERODUR®) mais ont des modules d'Young trop faibles (ZERODUR® : 91 GPa, PYREX® : 64 GPa).

Le carbure de silicium présente un faible coefficient de dilatation thermique ( $4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ). Cependant, son module d'Young est trop élevé pour l'application

horlogère (450 GPa) et surtout la stabilité du module d'Young avec la température est mauvaise ( $4.10^{-5}$ ).

## EXPOSÉ DE L'INVENTION

Un but de la présente invention est de proposer un ressort spiral réalisé à partir d'un matériau qui soit amagnétique ou faiblement magnétique, c'est-à-dire comportant pas ou peu d'ions magnétiques, dont le module d'Young soit supérieur à environ 200 GPa, qui soit très stable thermiquement, et qui soit compatible avec une fabrication collective et reproductible par la mise en œuvre de méthodes micro-technologiques.

Pour cela, l'invention propose un ressort spiral apte à être couplé mécaniquement à un balancier, comprenant au moins une lame enroulée en forme de spirale, la lame comprenant au moins l'un des matériaux suivants : grenat d'aluminate de terre rare, alexandrite, langasite, langatate, spinelle, saphir, fluorine, YLF.

Ces matériaux ci-dessus utilisés pour la réalisation du ressort spiral sont rigides, c'est-à-dire ont un module d'Young supérieur à 200 GPa, ne comportent pas d'ions magnétiques, sont durables dans le temps, sont très stables thermiquement et sont compatibles avec une fabrication collective et reproductible par la mise en œuvre de méthodes micro-technologiques. Ces matériaux sont donc parfaitement adaptés à la réalisation de ressorts spiraux présentant les caractéristiques recherchées.

Avantageusement, la lame peut comporter du YAG (Yttrium Aluminium Garnet, de formule  $Y_3Al_5O_{12}$ ). En effet, ce matériau est un matériau cristallin disponible industriellement, regroupant à la fois une excellente stabilité chimique (identique au saphir), un module d'Young élevé (310 GPa), une dilatation thermique modérée ( $6,9.10^{-6} K^{-1}$ ) et une grande stabilité thermique du module d'Young ( $-1,8.10^{-5}$ ) à comparer au silicium ( $-5,2.10^{-5}$ ) ou au carbure de silicium ( $4.10^{-5}$ ).

L'invention porte également sur un oscillateur mécanique comportant au moins un balancier formant un volant d'inertie couplé mécaniquement à au moins un tel ressort spiral.

L'invention porte également sur un mouvement d'horlogerie comprenant au moins un tel oscillateur mécanique.

L'invention porte également sur un procédé de réalisation d'un ressort spiral apte à être couplé mécaniquement à un balancier, comprenant la réalisation d'au moins une lame enroulée en forme de spirale à partir d'au moins l'un des matériaux suivants : grenat d'aluminate de terre rare, alexandrite, langasite, langatate, spinelle, saphir, fluorine, YLF.

La réalisation de la lame peut comporter au moins la mise en œuvre des étapes suivantes :

10 - collage direct, sur une couche dudit au moins un des matériaux, d'un premier masque dur métallique et/ou en semi-conducteur, le premier masque dur étant traversé par au moins une première ouverture débouchant sur la couche de matériau et correspondant à un motif du ressort spiral ;

15 - gravure d'au moins une portion de la couche de matériau destinée à former la lame, au niveau de la première ouverture, par la mise en œuvre d'au moins une gravure ionique, et/ou par la mise en œuvre d'au moins une implantation ionique dans la portion de la couche de matériau et d'au moins une gravure chimique de la portion de la couche de matériau ayant subie l'implantation ionique.

20 Ce procédé fait donc appel à un premier masque dur métallique et/ou en semi-conducteur qui, contrairement à un masque en résine, peut être réalisé avec une épaisseur importante, par exemple supérieure à environ 10  $\mu\text{m}$  ou environ 50  $\mu\text{m}$  voire supérieure à environ 100  $\mu\text{m}$  ou 200  $\mu\text{m}$ . En réalisant un tel premier masque dur, il est donc possible de graver la couche de matériau dur servant à former la lame du ressort spiral via la mise en œuvre d'une gravure ionique et/ou d'une implantation ionique couplée à une  
25 gravure chimique.

Ce procédé permet en outre de graver ces matériaux durs en ne nécessitant pas de réactifs chimiques pour former des composés volatiles avec ses éléments du fait que la gravure mise en œuvre n'est pas une gravure réactive telle qu'une gravure RIE ou DRIE. En effet, la gravure de ces matériaux est difficile à réaliser avec les  
30 techniques de gravure classiques. Ainsi, la mise en œuvre d'une gravure ionique réactive,

ou RIE (« Reactive Ion Etching » en anglais) n'est pas compatible avec tous ces matériaux durs car une telle gravure fait appel à des réactifs chimiques qui doivent former des composés volatiles avec tous les éléments de ces matériaux. Par exemple, le YAG ne peut pas être gravé par une gravure RIE de manière industrielle car il n'existe pas de réactif chimique disponible industriellement qui puisse former des composés volatiles avec tous les éléments chimiques du YAG. Une gravure purement ionique où l'abrasion est directement obtenue par bombardement ionique du matériau n'est également pas adaptée pour graver ces matériaux durs car cette gravure n'est pas sélective et grave le matériau à peu près à la même vitesse que les résines utilisées pour le masquage du matériau, voire moins rapidement. Or, pour réaliser la lame d'un ressort spiral, l'épaisseur de résine nécessaire pour réaliser la gravure d'une telle pièce est impossible à réaliser (une résine peut être déposée sur une épaisseur de quelques dizaines microns au maximum). De plus, une résine sera rapidement altérée par l'échauffement engendré par le bombardement ionique.

Le collage direct, également appelé « collage moléculaire » ou « collage par adhésion moléculaire », ou encore appelé « *wafer bonding* » ou « *direct bonding* » en anglais, est une technique d'assemblage permettant de solidariser deux surfaces via une mise en contact direct de ces deux surfaces sans faire appel à un matériau de collage (colle, cire, etc.). Dans ce type de collage, l'adhérence est obtenue grâce au fait que les surfaces à coller sont suffisamment lisses (typiquement avec une rugosité de l'ordre de 0,5 nm), exemptes de particules ou de contaminations, et rapprochées suffisamment l'une de l'autre pour permettre d'initier un contact intime entre les surfaces. Dans ce cas, les forces attractives entre les deux surfaces sont assez élevées pour provoquer une adhérence moléculaire des deux surfaces l'une avec l'autre. Le collage moléculaire est induit par l'ensemble des forces attractives d'interaction électronique entre les atomes ou molécules des deux surfaces à coller (forces de Van der Waals). Dans ce procédé, le collage direct réalisé entre la couche de matériau à graver et le premier masque dur permet de conférer un très bon maintien du premier masque dur sur la couche de matériau à graver notamment lors de la gravure de la couche de matériau à graver. Ce collage direct permet

également d'assurer un bon transfert thermique entre le premier masque dur et la couche de matériau à graver pendant la gravure de la couche de matériau à graver.

La gravure de la portion de la couche de matériau au niveau de la première ouverture par la mise en œuvre d'au moins une implantation ionique dans la portion de la couche de matériau et d'au moins une gravure chimique de la portion de la couche de matériau ayant subie l'implantation ionique peut être réalisée lorsque le matériau implanté est chimiquement stable avant l'implantation, c'est-à-dire correspond à un matériau qui ne se grave pas correctement avec les chimies usuelles de la microélectronique (HF, ammoniac,  $H_3PO_4$ ,  $H_2O_2$ , TMAH, eau régale,  $HNO_3$ , KOH, acide acétique, ou un mélange de ces produits), c'est-à-dire avec une vitesse de gravure inférieure à environ 10 nm/mn voire inférieure à environ 1 nm/mn en présence de ces composés, et chimiquement réactif après cette implantation, c'est-à-dire qui se gravera correctement en présence de ces éléments avec une vitesse de gravure supérieure à environ 10 nm/mn voire supérieure à environ 30 nm/mn.

Lorsque la portion de la couche de matériau est gravée par au moins une gravure ionique, l'épaisseur du premier masque dur peut être au moins égale au produit de l'épaisseur de la portion de la couche de matériau multipliée par le rapport de la vitesse de gravure du matériau du premier masque dur sur la vitesse de gravure du matériau de ladite couche de matériau lors de la gravure ionique. Ces vitesses de gravure peuvent être déterminées de manière empirique. Ainsi, cette condition permet d'assurer la présence du premier masque dur sur la couche de matériau à graver tout au long de la gravure.

Le procédé peut comporter en outre la réalisation de la première ouverture du premier masque dur qui est mise en œuvre avant ou après le collage direct du premier masque dur sur la couche de matériau.

Dans ce cas, la réalisation de la première ouverture du premier masque dur peut comporter au moins la mise en œuvre des étapes suivantes :

- réalisation d'un deuxième masque dur diélectrique sur une couche métallique et/ou en semi-conducteur destinée à former le premier masque dur, le deuxième masque dur étant traversé par au moins une deuxième ouverture débouchant

sur la couche métallique et/ou en semi-conducteur et correspondant au motif de la première ouverture ;

- gravure d'une partie de la couche métallique et/ou en semi-conducteur au niveau de la deuxième ouverture telle que la partie gravée de la couche métallique et/ou en semi-conducteur forme la première ouverture.

La réalisation du deuxième masque dur peut comporter au moins la mise en œuvre des étapes suivantes :

- dépôt d'une couche diélectrique sur la couche métallique et/ou en semi-conducteur ;

- gravure de la couche diélectrique selon le motif de la deuxième ouverture.

La gravure de la portion de la couche de matériau au niveau de la première ouverture peut être réalisée en mettant en œuvre alternativement des étapes de gravure ionique de parties de la portion de la couche de matériau et des étapes de nettoyage chimique retirant des résidus de gravure générés lors des étapes de gravure ionique, et/ou en mettant en œuvre alternativement des étapes d'implantation ionique de parties de la portion de la couche de matériau et des étapes de gravure chimique des parties de la portion de la couche de matériau ayant subies les étapes d'implantation ionique.

Le procédé peut comporter en outre, après la gravure de la portion de la couche de matériau, la mise en œuvre d'une étape de retrait mécanique et/ou chimique du premier masque dur.

Le procédé peut comporter en outre, avant le collage direct du premier masque dur sur la couche de matériau, la mise en œuvre d'un collage direct de la couche de matériau sur un support.

Dans ce cas, les matériaux du premier masque dur et du support peuvent être similaires, et, lorsque la gravure de la portion de la couche de matériau est réalisée à travers toute l'épaisseur de la couche de matériau, le retrait du premier masque dur peut être obtenu par la mise en œuvre d'une gravure chimique gravant également le support et libérant la couche de matériau vis-à-vis du support.



## BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

La présente invention sera mieux comprise à la lecture de la description d'exemples de réalisation donnés à titre purement indicatif et nullement limitatif en faisant référence aux dessins annexés sur lesquels :

- 5                   - la figure 1 représente une coupe transversale d'une lame d'un ressort spiral, objet de la présente invention, selon un mode de réalisation particulier ;
- la figure 2 représente une vue de dessus d'un ressort spiral, objet de la présente invention, selon un mode de réalisation particulier ;
- la figure 3 représente un oscillateur mécanique, objet de la présente invention, selon un mode de réalisation particulier et comprenant un balancier et un ressort spiral ;
- 10                   - les figures 4 à 10 représentent les étapes d'un procédé de réalisation d'un ressort spiral, objet de la présente invention, selon un mode de réalisation particulier.

Des parties identiques, similaires ou équivalentes des différentes figures décrites ci-après portent les mêmes références numériques de façon à faciliter le passage d'une figure à l'autre.

Les différentes parties représentées sur les figures ne le sont pas nécessairement selon une échelle uniforme, pour rendre les figures plus lisibles.

Les différentes possibilités (variantes et modes de réalisation) doivent être comprises comme n'étant pas exclusives les unes des autres et peuvent se combiner entre elles.

## EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

La figure 1 représente une section transversale de la lame 102, également appelée barreau, d'un ressort spiral 100 selon un mode de réalisation particulier. La figure 25 2 représente une vue de dessus du ressort spiral 100.

La lame 102 est réalisée en au moins un matériau dur qui est amagnétique ou faiblement magnétique, dont le module d'Young est supérieur à environ 170 GPa, qui est très stable thermiquement, et qui soit compatible avec une fabrication

collective et reproductible par la mise en œuvre de méthodes micro-technologiques. Ainsi, la lame 102 est réalisée en un ou plusieurs des matériaux durs suivants : grenat d'aluminate de terre rare ( $\text{TR}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , avec TR correspondant à l'élément du type terre rare), alexandrite ( $\text{BeAl}_2\text{O}_4$ ), langasite ( $\text{La}_3\text{GaSiO}_{14}$ ), langatate ( $\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_{14}$ ), spinelle ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), saphir, matériau fluoré tel que la fluorine ( $\text{CaF}_2$ ) ou le YLF ( $\text{LiYF}_4$ ).

Le grenat d'aluminate de terre rare peut être avantageusement du YAG (Yttrium Aluminium Garnet de formule  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ), dont le module d'Young est égal à environ 310 GPa.

Des exemples de dimensions du ressort spiral 100 sont donnés ci-dessous, ces dimensions pouvant être optimisées en fonction du matériau choisi et des contraintes d'utilisation (encombrement mécanique, période d'oscillation, moment d'inertie du balancier, etc.) :

- épaisseur, ou hauteur, h de la lame 102, et donc du ressort spiral 100, comprise entre environ 100  $\mu\text{m}$  et 150  $\mu\text{m}$  ;
- largeur e de la lame 102 comprise entre environ 30  $\mu\text{m}$  et 50  $\mu\text{m}$  ;
- espacement p entre deux spires voisines du ressort spiral 100 compris entre environ 150  $\mu\text{m}$  et 250  $\mu\text{m}$  ;
- nombre de spires, ou tours, du ressort spiral 100 compris entre environ 10 et 20 ;
- longueur totale de la lame 102 égale à environ 100 mm ;
- diamètre D du ressort spiral 100 égal à environ 10 mm ;
- diamètre d de la première spire égal à environ 1 mm.

En réalisant la lame 102 avec un ou plusieurs des matériaux durs cités ci-dessus, la plage de température de fonctionnement du ressort spiral 100 est comprise entre environ 10 et 50°C. Le couple du ressort spiral 100 pouvant être obtenu est égal à environ  $2 \cdot 10^{-4}$  N.mm. L'utilisation d'un tel ressort spiral 100 dans un mouvement d'horlogerie permet d'obtenir une précision comprise entre environ -4 et +6 secondes/24h.

La figure 3 représente une vue de dessus d'un oscillateur mécanique 200 comprenant le ressort spiral 100 et un balancier 202, formant un volant d'inertie, auquel le ressort spiral 100 est couplé mécaniquement par l'intermédiaire de l'une de ses extrémités

104. Une autre extrémité 106 du ressort spiral 100 est fixée à la pièce dans laquelle pivote l'axe du balancier 202. Le fonctionnement de cet oscillateur mécanique 200 est similaire à celui précédemment décrit en lien avec l'état de la technique.

La réalisation d'un tel ressort spiral 100 implique de mettre en œuvre un procédé de gravure particulier. En effet, la mise en œuvre d'une gravure ionique réactive, ou RIE (« Reactive Ion Etching » en anglais) n'est pas compatible avec les matériaux durs cités ci-dessus car une telle gravure fait appel à des réactifs chimiques qui doivent former des composés volatiles avec tous les éléments de ces matériaux, et qu'il n'est pas possible de réaliser un masque de résine ayant une épaisseur suffisante pour la gravure du ressort spiral 100.

Un exemple de procédé de réalisation d'un ressort spiral 100 à partir d'une couche 300 formée d'un ou plusieurs des matériaux précédemment énumérés est décrit ci-dessous en liaison avec les figures 4 à 10.

Dans l'exemple décrit ici, le matériau de la couche 300 est du YAG. La couche 300 a une épaisseur (dimension selon l'axe Z représenté sur la figure 4) comprise entre environ 100  $\mu\text{m}$  et 150  $\mu\text{m}$ .

Les dimensions latérales de la couche 300 (dimensions dans le plan (X,Y)) peuvent ne pas correspondre aux dimensions standards des substrats, ou wafers, du domaine de la microélectronique. Pour réaliser la gravure de la couche 300 avec des équipements standards de la microélectronique, la couche 300 est collée sur un support 302 correspondant ici à un substrat de dimensions latérales standards, par exemple de diamètre égal à 300 mm (figure 4). Ce substrat est ici composé de semi-conducteur, par exemple de silicium. Le collage de la couche 300 sur le support 302 permet également de renforcer le maintien mécanique de la couche 300 et faciliter sa manipulation du fait que le support 302 peut servir de poignée mécanique lors des manipulations.

Le collage de la couche 300 sur le support 302 est avantageusement un collage direct, ce qui permet de conférer un très bon maintien de la couche 300 sur le support 302 lors de la mise en œuvre des étapes suivantes du procédé de gravure, et permet également d'assurer un bon transfert thermique entre la couche 300 et le support 302 notamment pendant la gravure ultérieure de la couche 300.

Une autre couche 304 métallique et/ou en semi-conducteur est ensuite collée sur la couche 300 (figure 5). La couche 304 va être utilisée pour réaliser un premier masque dur 305 qui servira à la gravure de la couche 300. Dans l'exemple de réalisation décrit ici, la couche 304 correspond à un substrat de silicium. Lorsque la couche 300 est destinée à être gravée par gravure ionique, l'épaisseur de la couche 304 est choisie en fonction de l'épaisseur de la couche 300 qui est destinée à être gravée, ainsi que de la sélectivité de gravure par le faisceau ionique du matériau de la couche 300 vis-à-vis de celui de la couche 304. L'épaisseur de la couche 304 est choisie supérieure ou égale à l'épaisseur de la couche 300 multipliée par le rapport entre la vitesse de gravure du matériau de la couche 304 sur la vitesse de gravure du matériau de la couche 300 lors de la gravure ionique. Par exemple, dans le cas d'une couche 300 de YAG d'épaisseur égale à environ 100  $\mu\text{m}$ , et d'une couche 304 en silicium, du fait que la vitesse de gravure du silicium est environ deux fois supérieure à celle du YAG lors d'une gravure ionique, l'épaisseur de la couche 304 est choisie comme étant supérieure ou égale à environ deux fois l'épaisseur de la couche 300, c'est-à-dire supérieure ou égale à environ 200  $\mu\text{m}$ .

La couche 304 est solidarisée à la couche 300 via la mise en œuvre d'un collage direct entre ces deux couches, ce qui permet de conférer un très bon maintien de la couche 304 sur la couche 300 lors de la mise en œuvre de étapes suivantes du procédé de gravure, et permet également d'assurer un bon transfert thermique entre les couches 304 et 300 pendant les étapes ultérieures du procédé, notamment lors de la gravure de la couche 300.

Un recuit peut ensuite être mis en œuvre afin d'augmenter l'énergie de collage entre les couches 300 et 304. Ce recuit permet également d'augmenter l'énergie de collage entre la couche 300 et le support 302. Ce recuit peut être réalisé sous atmosphère de di-azote, par exemple à une température comprise entre environ 100°C et 300°C dépendante des matériaux en présence et plus particulièrement de leur différence de coefficient de dilatation thermique.

La couche 304 est ensuite gravée afin de former le premier masque dur 305. Cette gravure est destinée à former une ou plusieurs premières ouvertures dans la couche 304 dont le motif correspond à celui destiné à être gravé dans la couche 300,

c'est-à-dire le motif du ou des ressorts spiraux 100 destinés à être réalisés dans la couche 300. Pour cela, une couche diélectrique 306 destinée à former un deuxième masque dur 307 est déposée sur la couche 304 (figure 6). Dans l'exemple décrit ici, du fait que la couche 306 est déposée via un dépôt pleine plaque, des parties de cette couche 306 sont déposées également sur des parties de la couche 300 non recouvertes par la couche 304 ainsi que sur des parties du support 302 non recouvertes par la couche 300. Le matériau diélectrique de la couche 306 est par exemple du SiN ou du SiO<sub>2</sub>, et l'épaisseur de la couche 306 est par exemple comprise entre environ 3 µm et 5 µm.

Un masque de résine 308 est ensuite réalisé sur la structure réalisée, et recouvre les parties de la couche 306 qui ne sont pas destinées à être gravées. Le masque 308 comporte une ou plusieurs ouvertures 310 formées par photolithographie et gravure, et dont le motif correspond à celui de la ou des deuxièmes ouvertures 312 destinées à être formées à travers la couche 306 (elles-mêmes ayant un motif correspondant à celui de la ou des premières ouvertures du premier masque dur 305 destiné à être réalisé à partir de la couche 304). Une gravure de la couche 306, par exemple une gravure plasma, est ensuite mise en œuvre, formant la ou les deuxièmes ouvertures 312 à travers la couche 306, et formant donc le deuxième masque dur 307 (figure 7).

Le masque de résine 308 est ensuite retiré, puis la couche 304 est gravée selon le motif défini par le deuxième masque dur 307, par exemple par une gravure plasma profonde, formant la ou les premières ouvertures 314 à travers la couche 304 (figure 8). Le premier masque dur 305 est ainsi obtenu.

Le premier masque dur 305 est ensuite utilisé pour graver la couche 300 selon le motif défini par la ou les premières ouvertures 314. La couche 300 peut être gravée en mettant en œuvre une gravure ionique, transférant ainsi le motif de la ou des premières ouvertures 314 dans la couche 300. Cette gravure ionique grave la couche 300 en formant une ou plusieurs ouvertures 316 qui ici traversent toute l'épaisseur de la couche 300. Cette gravure ionique grave également les autres matériaux en présence, c'est-à-dire le deuxième masque dur 307, le premier masque dur 305 ainsi que le support 302, réduisant ainsi l'épaisseur de ces éléments. Comme décrit précédemment, l'épaisseur du premier masque dur 305 est suffisamment importante pour qu'au moins une partie du premier

masque dur 305 soit encore présente sur la couche 300 à la fin de cette gravure ionique. Sur la figure 9, on voit qu'une partie du premier masque dur 305 est toujours présente sur la couche 300 après la formation de la ou des premières ouvertures 316 à travers la couche 300. Le support 302 comporte également une épaisseur suffisante pour qu'il ne soit pas gravé sur toute son épaisseur lors de la mise en œuvre de cette gravure ionique. Sur la figure 9, l'ouverture 316 formée à travers la couche 300 se prolonge également à travers une partie de l'épaisseur du support 302.

De manière avantageuse, la gravure de la couche 300 est réalisée en mettant en œuvre alternativement plusieurs étapes de gravure ionique, gravant chacune une partie de l'épaisseur de la couche 300, et plusieurs étapes de nettoyage chimique retirant des résidus de gravure générés lors des étapes de gravure ionique. A chaque nouvelle étape de gravure, la ou les parties de la couche 300 qui sont gravées correspondent à celle(s) se trouvant à l'aplomb de celle(s) précédemment gravée(s).

La gravure de la couche 300 peut également être réalisée par la mise en œuvre d'une implantation ionique du matériau de la couche 300 à travers la ou les premières ouvertures 314 du premier masque dur 305, et d'une gravure chimique de la ou des portions de matériau ayant subies l'implantation ionique. Cette implantation ionique permet de rendre amorphe le matériau recevant le faisceau ionique (par exemple formé d'ions  $Ne^+$ ). La gravure chimique mise en œuvre correspond par exemple à une gravure humide utilisant une solution d' $H_3PO_4$  concentrée et à haute température (par exemple supérieure à environ  $80^\circ C$ ).

Etant donné l'épaisseur importante du matériau de la couche 300 qui est destinée à être gravée, la gravure de la couche 300 est avantageusement réalisée en mettant en œuvre alternativement plusieurs étapes d'implantation ionique, réalisant chacune une implantation d'ions dans une partie de l'épaisseur de la couche 300, et plusieurs étapes de gravure chimique des parties de la portion de la couche de matériau implantées ioniquement. A chaque nouvelle étape d'implantation ionique, la ou les parties de la couche 300 qui sont implantées se trouvent à l'aplomb de celle(s) précédemment gravée(s).

Une fois la gravure de la couche 300 achevée, le premier masque dur 305 est retiré mécaniquement, par exemple en mettant en œuvre une étape de planarisation mécano-chimique (CMP), et/ou chimiquement par gravure. Lorsque les ouvertures 316 réalisées à travers la couche 300 traversent toute l'épaisseur de la couche 300 et que les matériaux du premier masque dur 305 et du support 302 sont similaires, comme dans l'exemple décrit ici où le premier masque dur 305 et le support 302 sont en silicium, le retrait du premier masque dur 305 est avantageusement réalisé par la mise en œuvre d'une gravure chimique, par exemple via une solution de TMAH pour la gravure du silicium, cette gravure libérant également la couche 300 et donc le ou les ressorts spiraux 100, vis-à-vis du support 302 qui est gravé au niveau de son interface avec la couche 300 (figure 10).

La ou les ouvertures 316 formées à travers la couche 300 définissent ainsi les contours des éléments réalisés via ce procédé de gravure, correspondant ici à des éléments de type ressort spiral 100.

Dans le mode de réalisation particulier décrit ci-dessus, la couche 304 est tout d'abord solidarisée sur la couche 300 puis le premier masque dur 305 est réalisé à partir de cette couche 304. En variante, il est possible que le premier masque dur 305 soit collé sur la couche 300 après avoir été réalisé, c'est-à-dire après que la ou les ouvertures 314 aient été réalisées dans la couche 304. Dans ce cas, des étapes analogues à celles précédemment décrites en liaison avec les figures 6 à 8 sont mises en œuvre préalablement au collage du premier masque dur 305 sur la couche 300.

Dans le mode de réalisation particulier précédemment décrit, la couche 300 est gravée sur toute son épaisseur, la ou les ouvertures 316 traversant la couche 300 depuis sa face supérieure jusqu'à sa face inférieure. En variante, la couche 300 peut être gravée à travers une partie seulement de son épaisseur, les ouvertures 316 n'étant dans ce cas formées qu'à travers une partie de l'épaisseur de la couche 300.

**REVENDEICATIONS**

1. Ressort spiral (100) apte à être couplé mécaniquement à un balancier, comprenant au moins une lame (102) enroulée en forme de spirale, la lame (102) comprenant au moins l'un des matériaux suivants : grenat d'aluminate de terre rare, alexandrite, langasite, langatate, spinelle, saphir, fluorine, YLF.
2. Ressort spiral (100) selon la revendication 1, dans lequel la lame (102) comporte du YAG.
3. Oscillateur mécanique (200) comportant au moins un balancier (202) formant un volant d'inertie couplé mécaniquement à au moins un ressort spiral (100) selon l'une des revendications 1 ou 2.
4. Mouvement d'horlogerie comprenant au moins un oscillateur mécanique (200) selon la revendication 3.
5. Procédé de réalisation d'un ressort spiral (100) apte à être couplé mécaniquement à un balancier, comprenant la réalisation d'au moins une lame (102) enroulée en forme de spirale à partir d'au moins l'un des matériaux suivants : grenat d'aluminate de terre rare, alexandrite, langasite, langatate, spinelle, saphir, fluorine, YLF.
6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel la réalisation de la lame (102) comporte au moins la mise en œuvre des étapes suivantes :
  - collage direct, sur une couche (300) dudit au moins un des matériaux, d'un premier masque dur (305) métallique et/ou en semi-conducteur, le premier masque dur (305) étant traversé par au moins une première ouverture (314) débouchant sur la couche de matériau (300) et correspondant à un motif du ressort spiral (100) ;
  - gravure d'au moins une portion de la couche de matériau (300) destinée à former la lame (102), au niveau de la première ouverture (314), par la mise en œuvre d'au moins une gravure ionique, et/ou par la mise en œuvre d'au moins une implantation ionique dans la portion de la couche de matériau (300) et d'au moins une



gravure chimique de la portion de la couche de matériau (300) ayant subie l'implantation ionique.

5 7. Procédé selon la revendication 6, dans lequel, lorsque la portion de la couche de matériau (300) est gravée par au moins une gravure ionique, l'épaisseur du premier masque dur (305) est au moins égale au produit de l'épaisseur de la portion de la couche de matériau (300) multipliée par le rapport de la vitesse de gravure du matériau du premier masque dur (305) sur la vitesse de gravure du matériau de ladite couche de matériau (300) lors de la gravure ionique.

10 8. Procédé selon l'une des revendications 6 ou 7, comportant en outre la réalisation de la première ouverture (314) du premier masque dur (305) qui est mise en œuvre avant ou après le collage direct du premier masque dur (305) sur la couche de matériau (300).

15 9. Procédé selon la revendication 8, dans lequel la réalisation de la première ouverture (314) du premier masque dur (305) comporte au moins la mise en œuvre des étapes suivantes :

20 - réalisation d'un deuxième masque dur (307) diélectrique sur une couche métallique et/ou en semi-conducteur (304) destinée à former le premier masque dur (305), le deuxième masque dur (307) étant traversé par au moins une deuxième ouverture (312) débouchant sur la couche métallique et/ou en semi-conducteur (304) et correspondant au motif de la première ouverture (314) ;

25 - gravure d'une partie de la couche métallique et/ou en semi-conducteur (304) au niveau de la deuxième ouverture (312) telle que la partie gravée de la couche métallique et/ou en semi-conducteur (304) forme la première ouverture (314).

10. Procédé selon la revendication 9, dans lequel la réalisation du deuxième masque dur (307) comporte au moins la mise en œuvre des étapes suivantes :

30 - dépôt d'une couche diélectrique (306) sur la couche métallique et/ou en semi-conducteur (304) ;

- gravure de la couche diélectrique (306) selon le motif de la deuxième ouverture (312).

5 11. Procédé selon l'une des revendications 6 à 10, dans lequel la gravure de la portion de la couche de matériau (300) au niveau de la première ouverture (314) est réalisée en mettant en œuvre alternativement des étapes de gravure ionique de parties de la portion de la couche de matériau (300) et des étapes de nettoyage chimique retirant des résidus de gravure générés lors des étapes de gravure ionique, et/ou en  
10 mettant en œuvre alternativement des étapes d'implantation ionique de parties de la portion de la couche de matériau (300) et des étapes de gravure chimique des parties de la portion de la couche de matériau (300) ayant subies les étapes d'implantation ionique.

12. Procédé selon l'une des revendications 6 à 11, comportant en outre, après la gravure de la portion de la couche de matériau (300), la mise en œuvre  
15 d'une étape de retrait mécanique et/ou chimique du premier masque dur (305).

13. Procédé selon l'une des revendications 6 à 12, comportant en outre, avant le collage direct du premier masque dur (305) sur la couche de matériau (300), la mise en œuvre d'un collage direct de la couche de matériau (300) sur un support (302).  
20

14. Procédé selon les revendications 12 et 13, dans lequel les matériaux du premier masque dur (305) et du support (302) sont similaires, et dans lequel, lorsque la gravure de la portion de la couche de matériau (300) est réalisée à travers toute l'épaisseur de la couche de matériau (300), le retrait du premier masque dur (305) est obtenu par la  
25 mise en œuvre d'une gravure chimique gravant également le support (302) et libérant la couche de matériau (300) vis-à-vis du support (302).

1 / 5

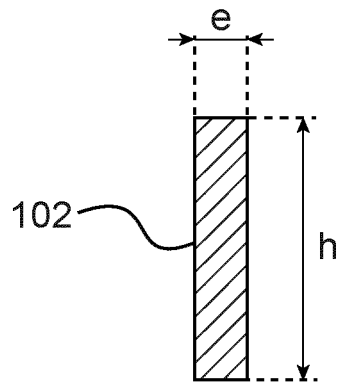


FIG. 1

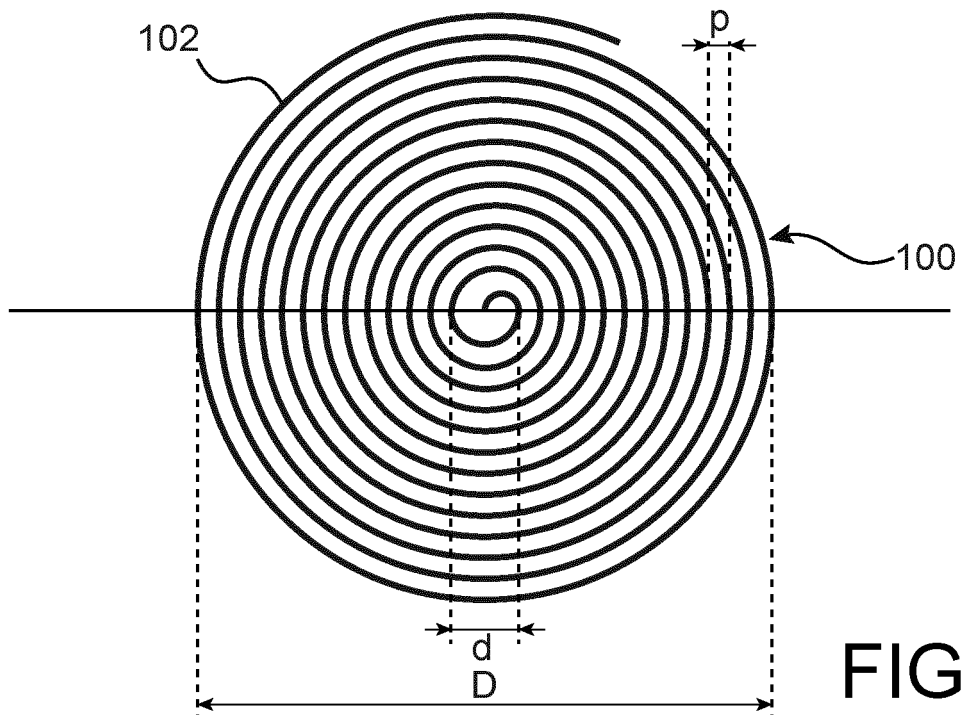


FIG. 2

2 / 5

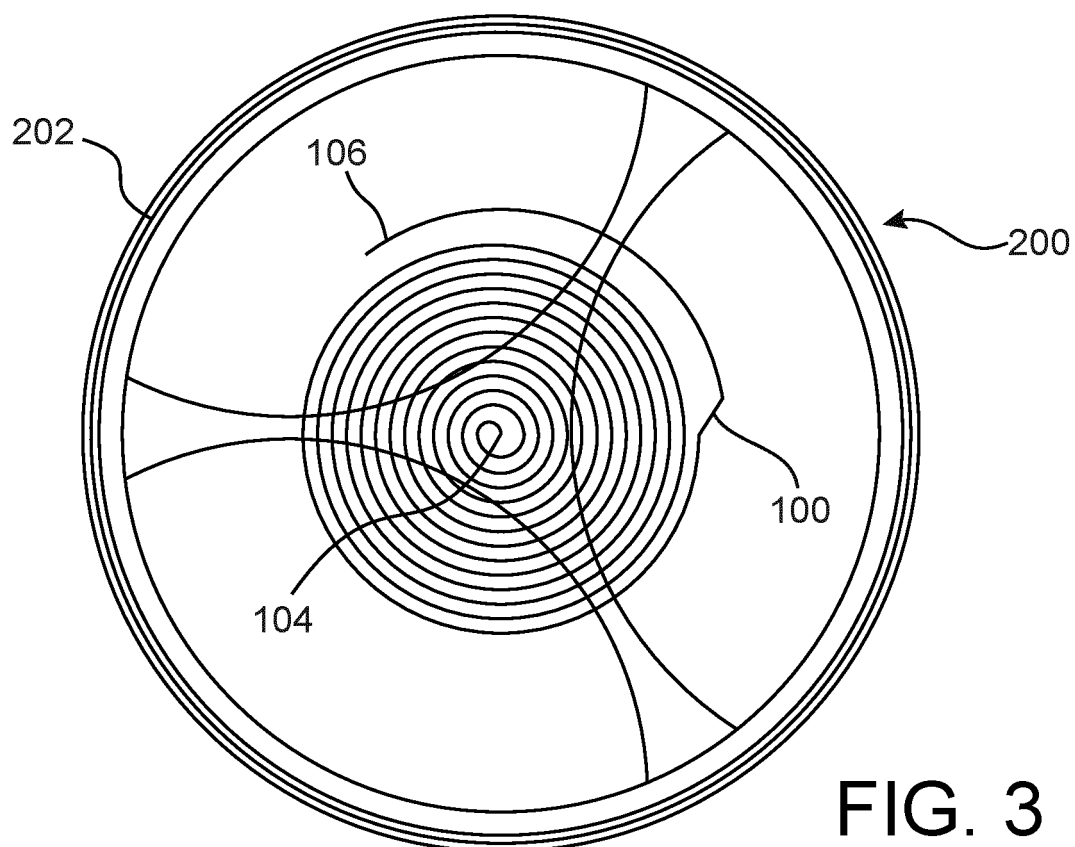


FIG. 3

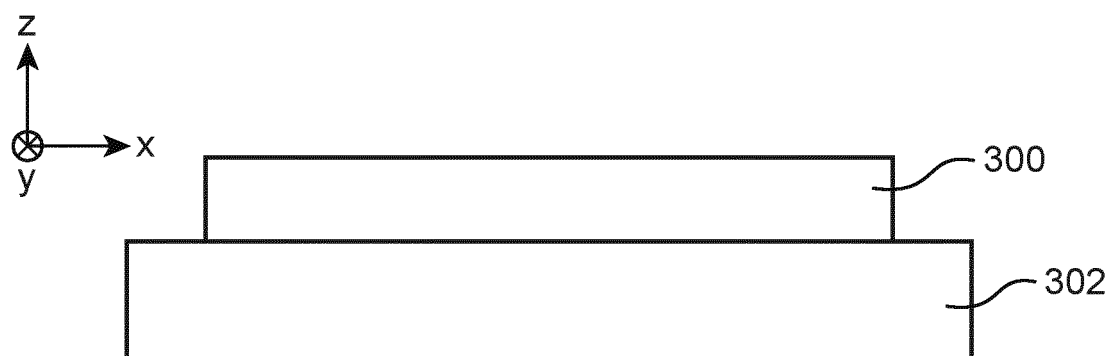


FIG. 4

3 / 5

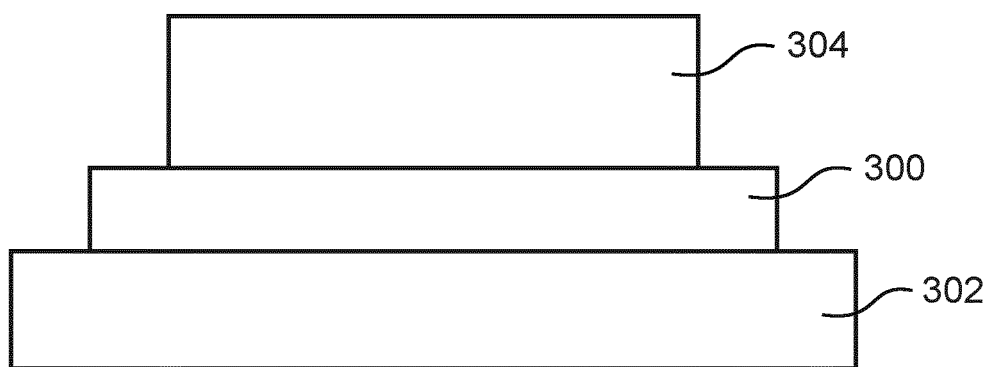


FIG. 5

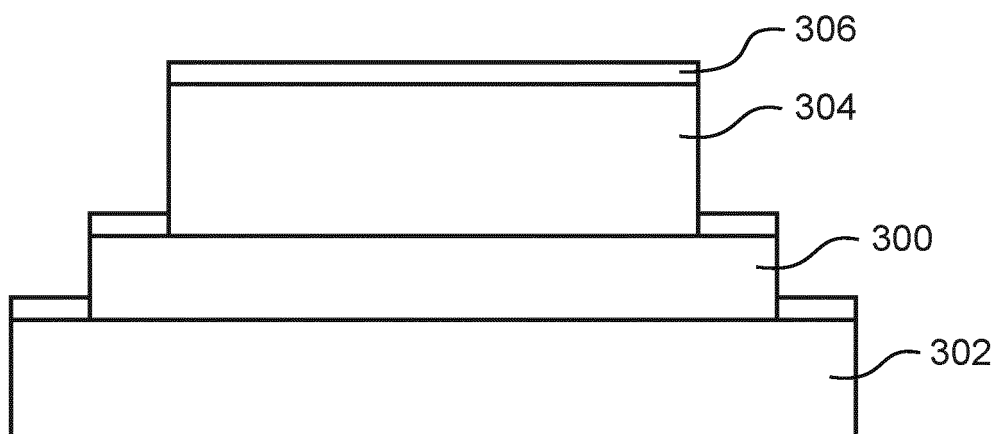


FIG. 6

4 / 5

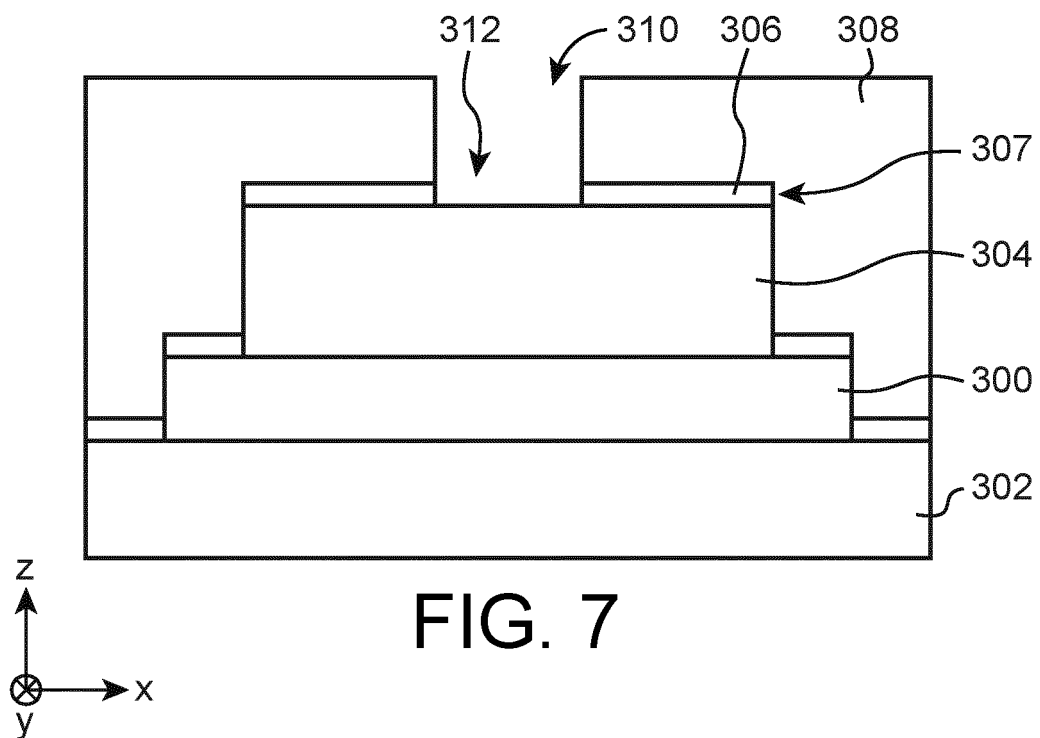


FIG. 7

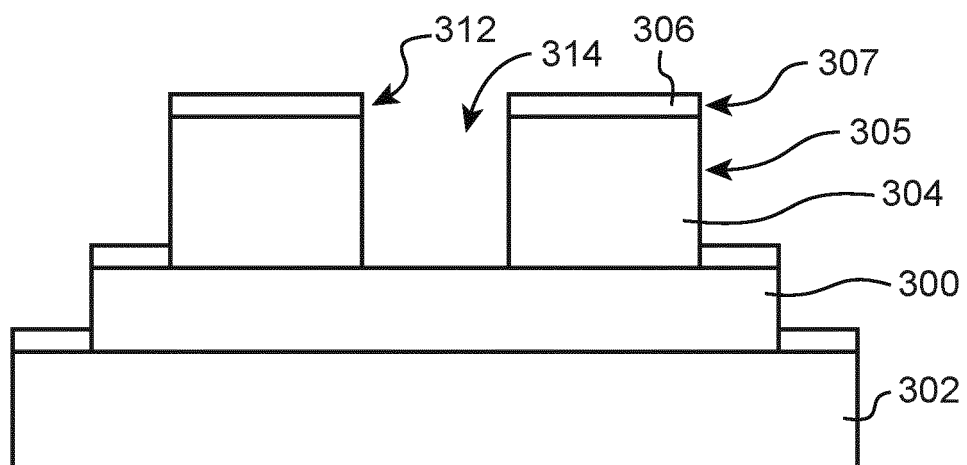


FIG. 8

5 / 5

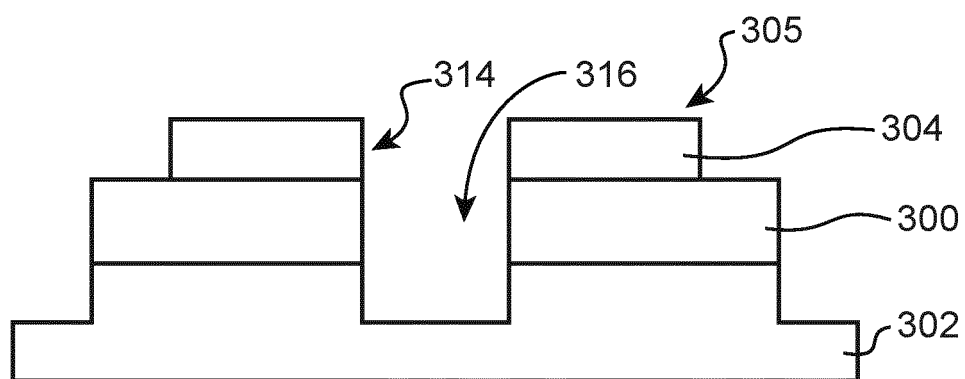


FIG. 9

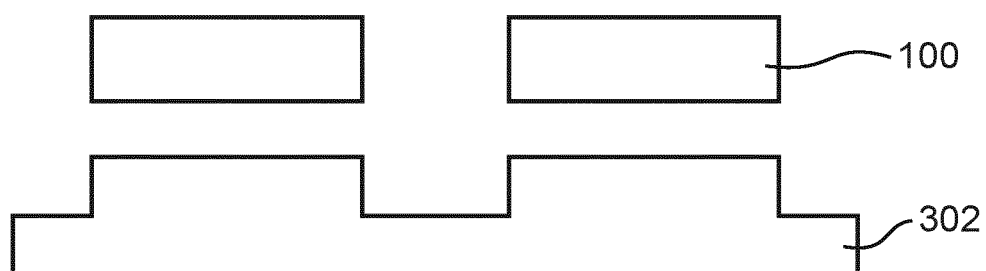


FIG. 10


**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**
N° d'enregistrement  
national
 établi sur la base des dernières revendications  
dépôtées avant le commencement de la recherche

 FA 814372  
FR 1557061

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	WO 2015/106828 A1 (SWATCH GROUP RES & DEV LTD [CH]) 23 juillet 2015 (2015-07-23)	1-5	G04B17/08
Y	* page 4, lignes 16-24; revendications 1,4,7; figure 2 * * page 6, lignes 4-26 * * page 7, lignes 5-18 * * page 8, lignes 1-10 *	6-14	G04D3/00 G04D7/10
Y	HYOUNG-KYOON JUNG ET AL: "Silicon/quartz bonding and quartz deep RIE for the fabrication of quartz resonator structures", NANO/MICRO ENGINEERED AND MOLECULAR SYSTEMS, 2008. NEMS 2008. 3RD IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 6 janvier 2008 (2008-01-06), pages 1172-1176, XP031263630, ISBN: 978-1-4244-1907-4 * le document en entier *	6-14	
A	WO 2015/092012 A2 (ROLEX SA [CH]) 25 juin 2015 (2015-06-25) * page 12, ligne 17 - page 13, ligne 4; figure 1 *	5-14	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) G04B F16F G04D B81C B22C H01L C09K
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
6 avril 2016		Matos Gonçalves, M	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		D : cité dans la demande	
A : arrière-plan technologique		L : cité pour d'autres raisons	
O : divulgation non-écrite		.....	
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	



**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1557061 FA 814372**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **06-04-2016**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 2015106828 A1	23-07-2015	AUCUN	
-----			
WO 2015092012 A2	25-06-2015	CH 709082 A2	30-06-2015
		WO 2015092012 A2	25-06-2015
-----			