(19) CONFÉDÉRATION SUISSE
INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) **CH 721 146 A1**

(51) Int. Cl.: ***B81C 99/00*** *(2010.01)*
G04D 3/00 *(2006.01)*
C23C 16/40 *(2006.01)*
B81C 1/00 *(2006.01)*
G04B 17/06 *(2006.01)*
G04B 15/08 *(2006.01)*
G04B 13/02 *(2006.01)*

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

(12) DEMANDE DE BREVET

(21) Numéro de la demande: 001041/2023

(22) Date de dépôt: 21.09.2023

(43) Demande publiée: 31.03.2025

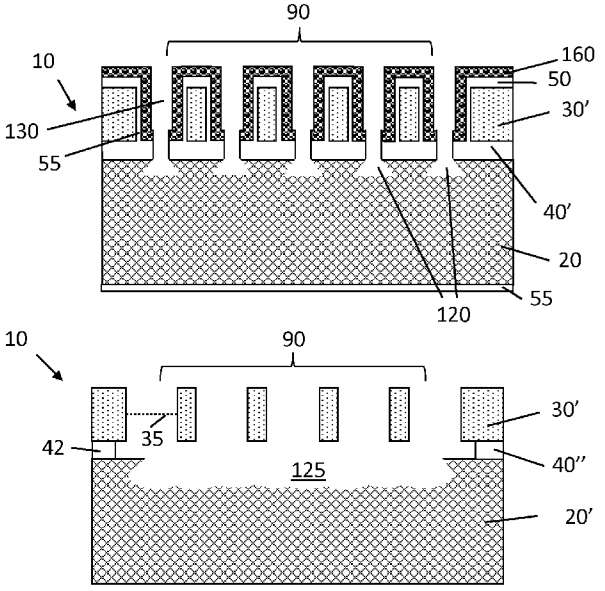
(71) Requérant:
Richemont International SA, 10, route des Biches
1752 Villars-sur-Glâne (CH)

(72) Inventeur(s):
Mickaël Chabart, 2014 Fleurier (CH)

(74) Mandataire:
Novagraaf International SA, Chemin de l'Echo 3
1213 Onex (CH)

(54) Procédé de fabrication de composants horlogers en silicium

(57) L'invention concerne un procédé de fabrication d'une pluralité de composants horlogers (90) dans une plaquette de fabrication (10) de type SOI, abreviation de silicon-on-insulator. Le procédé comprend les étapes de: a) former les composants horlogers (90) en gravant des motifs dans une couche de travail de la plaquette SOI afin d'obtenir une couche de travail structurée (30') et des régions dans lesquelles le matériau de la couche de travail a été éliminé pour exposer la couche d'oxyde enterrée de la plaquette SOI en-dessous; b) optionnellement former une couche d'oxyde de silicium (55) au moins sur les surfaces flancs des composants horlogers gravées à l'étape a); c) déposer une couche de résine (160) au moins sur la couche de travail structurée (30') et sur les parties exposées de la couche d'oxyde enterrée; d) structurer la résine (160) en éliminant au moins une partie de la résine déposée sur la couche d'oxyde enterrée; e) retirer les parties de la couche d'oxyde enterrée se trouvant en dessous de la résine éliminée à l'étape d) afin d'obtenir une couche d'oxyde enterrée ajourée (40') et des régions éliminées dans lesquelles le matériau de la couche enterrée a été éliminé pour exposer la couche de support (20) de la plaquette SOI en dessous; f) effectuer une gravure anisotrope du silicium dans la couche de support (20) au travers des régions éliminées de la couche d'oxyde enterrée ajourée (40') afin d'obtenir une couche de support excavée (20') ayant au moins une cavité (125) formée en dessous d'au moins un composant horloger (90); et g) éliminer les parties de la couche d'oxyde enterrée restant entre ladite au moins une cavité (125) et ledit au moins un composant horloger (90) agencé au-dessus de ladite cavité (125) afin d'obtenir une couche d'oxyde enterrée structurée (40'') ayant des parties subsistantes (42) liant toujours la couche de support excavée (20') à la couche de travail structurée (30').



Description

Domaine technique

[0001] L'invention concerne un procédé de fabrication de composants horlogers en silicium sur une plaquette de type „silicon-on-insulator" (SOI), une telle plaquette comprenant une couche de support en silicium, une couche de travail en silicium dans laquelle les composants sont fabriqués, et une couche d'oxyde de silicium séparant ces deux couches. Un tel procédé de fabrication comprend généralement des étapes de microfabrication incluant la lithographie et la gravure sèche des couches de la plaquette ainsi que des étapes de fabrication postérieures à la gravure incluant la libération des composants.

Etat de la technique

[0002] La fabrication de composants horlogers en silicium tels que, mais de façon non limitative, des ressorts spiraux, des cames, des ressorts, des cliquets, des roues et des ancres en utilisant des procédés de microfabrication est bien connue. Avantageusement, plusieurs centaines de composants horlogers peuvent être fabriqués sur une seule plaquette (en anglais „wafer") en utilisant ces technologies. Il est, par exemple, connu de réaliser une pluralité de résonateurs en silicium avec une très haute précision en utilisant des procédés de photolithographie et d'usinage par gravure dans une plaquette en silicium. Les procédés de réalisation de ces composants horlogers utilisent généralement des plaquettes de silicium monocristallin, mais des plaquettes en silicium polycristallin ou amorphe sont également utilisables.

[0003] Le silicium est un matériau diamagnétique, et son utilisation pour la fabrication de composants horlogers, et notamment pour les composants de l'organe régulateur d'un mouvement de montre mécanique, est avantageuse car aucun effet rémanent n'est observé après l'exposition de ce matériau aux champs magnétiques. De plus, les variations du module d'Young d'un composant horloger en silicium en fonction de la température peuvent être compensées par l'ajout d'une couche d'oxyde SiO_2 sur le composant. Quand les composants horlogers sont réalisés à partir d'une plaquette en silicium monocristallin, l'une quelconque des trois orientations cristallines <100>, <110> ou <111> peut être utilisée.

[0004] Les plaquettes de silicium sont proposées sous forme de galette simple, par exemple des wafers de type SSP („Single Side polished" en anglais) ou de type DSP („Dual Side Polished" en anglais). Cependant, ce sont les palettes SOI („silicon-on-insulator" en anglais) qui sont le plus souvent utilisées pour la fabrication de composants horlogers. Une plaquette SOI comprend une couche de travail en silicium (la couche „device" en anglais) dans laquelle les composants horlogers sont fabriqués, une couche de support en silicium qui sert de substrat ou de support lors de la fabrication des composants (la couche „handle" en anglais), et une couche d'oxyde enterrée en SiO_2 qui se trouve entre les deux couches de silicium (la couche „buried oxide layer" ou BOX en anglais). La surface de la couche de travail et éventuellement la surface de la couche de support peuvent également être polies pour faciliter des étapes de lithographie sur ces couches.

[0005] Après les étapes de lithographie et de gravure pour initialement former les composants horlogers dans la couche de travail, ces derniers sont normalement libérés de la couche de support et de la couche d'oxyde enterrée de la plaquette SOI afin de faciliter des étapes de fabrication subséquentes. De cette manière, après la libération, les composants horlogers ne sont supportés structurellement que par des ponts de liaison fins qui les maintiennent attachés aux parties subsistantes de la couche de travail, ce qui permet notamment d'effectuer les étapes de fabrication subséquentes sur l'ensemble de la surface externe des composants de la plaquette. Les étapes subséquentes peuvent notamment comprendre des étapes d'oxydation et désoxydation pour le lissage des surfaces des composants. Les étapes subséquentes peuvent également comprendre des étapes d'oxydation et désoxydation pour ajuster les dimensions des composants (par exemple afin de corriger la raideur quand les composants sont des spiraux ou des résonateurs) et/ou des étapes d'oxydation pour former une couche externe d'oxyde de silicium sur les composants aux fins d'une compensation thermique et/ou d'un renforcement mécanique. Après ces étapes subséquentes, les composants horlogers peuvent être détachés de la plaquette et montés dans par exemple le mouvement d'une pièce d'horlogerie.

[0006] La libération des composants horlogers sur une plaquette SOI peut être réalisée par différentes méthodes. Une approche de libération est décrite dans les documents de brevet JP2017219520 et WO2019180177. Selon cette approche, après la formation des composants par gravure, on fait croître une couche d'oxyde de silicium en surface du silicium. Cette couche d'oxyde sert de protection pour les composants formés. Par la suite, on réalise une photolithographie et une gravure pour exposer le silicium de la couche de support et graver la couche de support en l'attaquant par la face opposée aux composants, ce qui enlève la couche de support en dessous des composants. Pour terminer la libération selon cette alternative, on élimine la couche enterrée du wafer SOI en dessous des composants ainsi que la couche de protection sur les composants. Cette approche de libération est relativement longue et couteuse, car elle exige une structuration (voire une photolithographie et une gravure) au travers de la couche de support épaisse de la plaquette SOI.

[0007] Selon une autre approche décrite dans le document WO2019180596, après la formation des composants, la couche de travail (ou une partie de cette couche comprenant les composants) est séparée de la couche de support. Cette séparation peut être facilitée par la gravure d'une saignée entourant les composants ainsi que des ouvertures dans la couche de travail. Par la suite, la couche d'oxyde enterrée est gravée avec de la vapeur d'acide hydrofluorique (HF) qui passe au travers des ouvertures dans la couche de travail, et la partie de la couche de travail définie par la saignée est séparée de la couche de support de la plaquette SOI. Dans cette approche de libération, puisque la couche de travail

est beaucoup plus fine et fragile que la couche de support, la réalisation d'étapes de fabrication subséquentes est plus délicate et risquée car elles sont effectuées sans le bénéfice de la couche de support, même pour le cas où elle est partiellement éliminée.

[0008] Il serait alors avantageux d'avoir un procédé de fabrication de composants horlogers en silicium comprenant des étapes de libération des composants qui sont moins longues, plus efficaces et qui permettent de garder le bénéfice structurel de la couche de support pour des étapes de fabrication subséquentes qui ont lieu sur les composants de la plaquette SOI après leur libération. Par ailleurs, de manière générale, la fabrication de composants horlogers en silicium comprend un nombre important d'étapes, et il serait alors également désirable d'avoir un procédé de fabrication de tels composants ayant un nombre d'étapes réduit.

Bref résumé de l'invention

[0009] Un but de la présente invention est de proposer un procédé de fabrication d'une pluralité de composants horlogers sur une plaquette SOI, qui permet d'éviter ou de pallier les inconvénients ci-dessus, ou en tout cas d'offrir un meilleur compromis entre ces inconvénients.

[0010] En particulier, ce but est au moins partiellement atteint en proposant un nouveau procédé de fabrication de composants horlogers en silicium selon lequel les composants sont libérés sans une gravure longue et couteuse de la couche de support de la plaquette SOI et selon lequel on peut garder le bénéfice structurel de la couche de support pour des étapes de fabrication subséquentes effectuées sur les composants de la plaquette SOI après leur libération. Ainsi, selon un aspect, la présente invention concerne un procédé de fabrication d'une pluralité de composants horlogers présentant des surfaces flancs (voire des surfaces latérales des composants horlogers, c'est-à-dire les surfaces des composants horlogers qui sont généralement normales au plan général de la plaquette) dans une plaquette de fabrication de type SOI, la plaquette SOI comprenant une couche de support en silicium, une couche de travail en silicium, et une couche d'oxyde enterrée en oxyde de silicium séparant la couche de support de la couche de travail le procédé comprenant les étapes suivantes : (a) former les composants horlogers en gravant des motifs dans la couche de travail afin d'obtenir une couche de travail structurée et des régions éliminées de la couche de travail autour des motifs gravés (voire autour de la structure des composants horlogers), dans lesquelles le matériau de la couche de travail a été éliminé pour exposer la couche d'oxyde enterrée en-dessous; (b) optionnellement, former une couche d'oxyde de silicium sur au moins sur une partie, et de préférence sur toutes, les surfaces flancs des composants horlogers gravés à l'étape (a) ; (c) déposer une couche de résine au moins sur la couche de travail structurée et sur les parties exposées de la couche d'oxyde enterrée (et de préférence aussi sur les surfaces flancs) ; (d) structurer la résine en éliminant au moins une partie de la résine déposée sur la couche d'oxyde enterrée; (e) retirer des parties de la couche d'oxyde enterrée se trouvant en dessous de la résine éliminée à l'étape (d), afin d'obtenir une couche d'oxyde enterrée ajourée et des régions éliminées de la couche d'oxyde enterrée dans lesquelles le matériau de la couche enterrée a été éliminé pour exposer la couche de support en dessous ; (f) effectuer une gravure anisotrope du silicium dans la couche de support au travers des régions éliminées de la couche d'oxyde enterrée ajourée, afin d'obtenir une couche de support excavée ayant au moins une cavité formée en dessous d'au moins un, et de préférence en dessous de chaque, composant horloger; et (g) éliminer les parties de la couche d'oxyde enterrée restant entre ladite au moins une, et de préférence entre chaque, cavité et ledit au moins un, et de préférence le ou les composants horlogers agencé(s)au-dessus de ladite cavité, afin d'obtenir une couche d'oxyde enterrée structurée ayant des parties subsistantes liant toujours la couche de support excavée à la couche de travail structurée.

[0011] Dans un mode de réalisation, la désoxydation de la plaquette SOI-voire l'élimination des couches oxydes sur la plaquette SOI - à l'étape (g) permet de réaliser à la fois la libération des composants horlogers dans la plaquette SOI et un lissage des surfaces flancs gravées de ces composants.

[0012] D'autres caractéristiques avantageuses et privilégiées du procédé de fabrication sont précisées dans la description et les sous-revendications ci-dessous.

Brève description des figures

[0013] Des exemples de mise en œuvre de l'invention sont indiqués dans la description illustrée par les figures annexées dans lesquelles :

- Les figures 1a-1q illustrent schématiquement une série d'étapes de fabrication d'un composant horloger en silicium dans une plaquette SOI selon un mode de réalisation ;
- Les figures 2 et 2A sont des vues de dessus de la couche de travail d'une plaquette SOI après les étapes de la figure 1 selon un mode de réalisation ; et
- La figure 3 est une vue en section selon la ligne III-III de la figure 2.

Exemples de mode de réalisation de l'invention

[0014] Dans tout ce qui suit, les orientations sont les orientations des figures. En particulier, les termes comme „supérieur", „inférieur", „gauche", „droit", „dessus", „dessous", „vers l'avant" et „vers l'arrière" s'entendent généralement par rapport au sens de représentation des figures.

[0015] Les figures 1a-1q illustrent une série d'étapes de fabrication schématiques d'un composant horloger dans une plaquette SOI 10 selon un mode de réalisation de l'invention. Bien entendu, plusieurs composants horlogers peuvent être fabriqués dans la plaquette SOI 10 en même temps, mais les vues de la figure 1 sont isolées sur un seul composant par simplicité. Le procédé commence avec une plaquette SOI 10 illustrée à la figure 1a, cette plaquette SOI 10 comprenant une couche de support 20 en silicium, une couche de travail 30 en silicium, et une couche d'oxyde enterrée 40 séparant les deux couches de silicium 20, 30 qui est notamment en oxyde de silicium (SiO_2). Le dessin n'est pas à l'échelle, mais à titre d'exemple, la couche de support 20 peut avoir une épaisseur de 500 µm, la couche de travail 30 peut avoir une épaisseur de 120 µm, et la couche d'oxyde enterrée 40 peut avoir une épaisseur de 2 µm. Les couches de support et de travail peuvent être du même type de silicium ou de types différents - par exemple de silicium monocristallin avec une orientation cristalline quelconque, du silicium polycristallin, ou du silicium amorphe. Les couches de silicium 20, 30 (et notamment la couche de travail 30) peuvent être dopés type N ou type P. Par exemple, l'utilisation d'un silicium fortement dopé peut être avantageuse pour la fabrication des résonateurs car, par exemple, on constate une déformation moindre de la matière dopée lors de l'oxydation thermique sous certaines conditions.

[0016] Dans la figure 1b, une étape de lithographie commence avec la formation d'une couche d'oxyde de silicium 50 sur la surface supérieure de la couche de travail 30. Par „lithographie", on entend l'ensemble des opérations permettant de transférer une image ou un motif sur ou au-dessus de la plaquette SOI 10 vers cette dernière. La couche d'oxyde 50 peut par exemple avoir une épaisseur comprise entre 0.4 - 6 µm, et elle peut être formée par oxydation thermique ou alternativement par un dépôt de type PVD, CVD, ou ALD. Si la couche d'oxyde 50 est formée par un procédé de dépôt directionnel tel que le CVD ou le PVD, l'oxyde se forme uniquement sur la surface supérieure de la couche de support 20, tel qu'illustré à la figure 1b. Alternativement, si la couche d'oxyde 50 est formée par oxydation thermique, on remarque que l'oxyde 50 se forme généralement en même temps sur la surface de la couche de support 20 (si cette dernière n'est pas couverte par un masque d'épargne) ou encore un second dépôt directionnel de type CVD ou PVD peut être effectué sur la surface de la couche de support 20. De manière générale, la formation de la couche d'oxyde 50 avant le dépôt d'une couche de résine (voir la figure 1c) permet de déposer une couche de résine relativement fine et uniforme avec une bonne homogénéité de surface et ainsi d'optimiser la gravure subséquente de motifs fins et profonds dans la couche de travail 30. Cependant, dans d'autres modes de réalisation, il est également possible de réaliser une étape de lithographie sans la couche d'oxyde, notamment en utilisant une résine photosensible plus épaisse.

[0017] A la figure 1c, la couche d'oxyde 50 est recouverte d'une couche de résine 60, qui est typiquement une résine photosensible de type positif ou négatif. Cette couche de résine peut avoir une épaisseur comprise entre 0.5 - 12 µm, à titre purement illustratif. Par la suite, dans la figure 1d, la couche de résine 60 est structurée de préférence en utilisant une étape de photolithographie avec une source de lumière ultraviolette 80 ainsi que, par exemple, un masque d'exposition 70 tel qu'un photomasque. Un système de stepper et réticule peut également être utilisé pour l'étape de photolithographie. Dans l'exemple illustré, la couche 60 comprend une résine photosensible de type positif dont les parties 60E de la résine qui sont exposées à la lumière deviennent solubles dans un révélateur et les parties non exposées restent insolubles. Selon d'autres modes de réalisation, la résine peut être structurée par un faisceau laser ou d'électrons.

[0018] Dans la figure 1e, la couche de résine 60 est ouverte après avoir été développée par un révélateur, notamment un solvant qui élimine les parties exposées 60E de la résine par voie chimique. Ensuite, à la figure 1f, les parties de la couche d'oxyde 50 qui se trouvaient en dessous des parties exposées 60E de la résine sont aussi retirées de la surface de la couche de travail 30, par exemple en employant une gravure plasma sélective avec les gaz CH_4/O_2. L'utilisation d'une technique de gravure directionnelle est généralement privilégiée lors de cette étape car elle est plus précise, mais alternativement une gravure à base de vapeur d'acide hydrofluorique (HF) peut aussi être utilisée.

[0019] A l'étape illustrée à la figure 1g, la partie restante de la couche de résine 60 est éliminée et ensuite, à l'étape de la figure 1h, des motifs sont gravés dans la couche de travail 30 au travers de la couche 50 structurée pour former le composant horloger 90. En général, les motifs gravés s'étendent sur toute l'épaisseur de la couche de travail 30 tel qu'illustré, et à cette fin la couche d'oxyde enterrée 40 peut agir comme un stop lors de la gravure. De cette manière, l'épaisseur des composants horlogers 90 correspond à l'épaisseur de la couche de travail 30. Comme illustré, à la fin de cette étape on obtient une couche de travail structurée 30' avec des régions 130 se trouvant autour de la structure du composant dans lesquelles le matériau de la couche de travail 30 a été éliminé, exposant ainsi des parties de la couche d'oxyde enterrée 40 en dessous de ces régions éliminées 130.

[0020] La gravure à l'étape de la figure 1h peut notamment être effectuée par une technique de gravure ionique réactive profonde (également connue sous l'acronyme DRIE pour „Deep Reactive Ion Etching" en anglais). La gravure DRIE permet d'usiner des trous et des tranchées profondes dans la couche 30 avec un rapport largeur/hauteur important, ce qui est bien adapté pour des composants micromécaniques comme des composants horlogers. Alternativement, la structuration de la couche de support peut être réalisée par d'autres technologies de gravure telles qu'une opération de gravure humide/chimique anisotrope, par exemple en utilisant un bain d'hydroxyde de potassium (KOH) ou d'hydroxyde de tétramé-

thylammonium (TMAH). Une structuration par gravure humide/chimique peut notamment être plus rapide qu'une gravure ionique réactive profonde, mais la résolution dimensionnelle des structures gravées est généralement moins bonne. Si une opération de gravure humide/chimique anisotrope est employée, la couche d'oxyde 50 n'est normalement pas formée sur la surface supérieure de la couche de support 20 avant le dépôt de la résine 60 sur cette surface.

[0021] Il est également possible pour la partie restante de la couche de résine 60 d'être toujours présente lors de l'étape de gravure (DRIE ou autre) de la couche de travail 30. Cette partie restante de la couche de résine peut être retirée après la gravure, et dans ce cas la couche de travail 30 est gravée au travers des deux couches 50, 60 structurées (ou seulement à travers la couche 60 structurée si une couche oxyde 50 n'est pas présente). A titre d'exemple, une résine positive peut être retirée par des solvants de type acétone ou diméthylsulfoxyde (DMSO) ou avec un plasma O_2 soit avant soit après l'étape de gravure . Pour une résine négative comme le SU-8, un plasma CF_4/O_2 peut être employé pour son retrait.

[0022] Les figures 1i-1q illustrent l'approche de libération des composants horlogers 90 selon un mode de réalisation de l'invention. A la figure 1i, une couche d'oxyde 55 de silicium (SiO_2) est de préférence formée sur les surfaces flancs 95 du composant horloger et de préférence sur l'ensemble de chacune de ses surfaces flancs. La couche d'oxyde 55 peut être formée par un dépôt de type PVD, CVD, ou ALD, mais de préférence elle est formée par oxydation thermique. La couche d'oxyde 55 est formée également sur tout le silicium exposé de la plaquette SOI 10 incluant la couche de support 20 comme illustré. L'épaisseur de cette couche d'oxyde 55 peut varier mais de préférence elle est d'au moins 0.05 µm. Par ailleurs, la couche d'oxyde 55 rejoint les couches d'oxydes 50 et 40 déjà présentes sur les surfaces supérieure et inférieure du composant 90, et ces dernières couches peuvent aussi devenir plus épaisses si le dépôt de cette étape est effectué par oxydation thermique. Selon une variante, la couche d'oxyde 50 peut être éliminée après l'étape de gravure à la figure 1h, et dans ce cas la couche d'oxyde 55 se forme également sur la surface supérieure des composants horlogers 90 lors de l'étape de la figure 1i.

[0023] A la prochaine étape de la figure 1j, les parties exposées de la couche d'oxyde enterrée 40 et la couche de travail structurée 30' (qui est déjà recouverte par les couches d'oxydes 50, 55) sont recouvertes d'une couche de résine 160. La résine 160 est de préférence une résine photosensible de type positif, et elle peut avoir une épaisseur comprise entre 0.5 - 6µm, à titre illustratif. Le dépôt de la résine 160 est de préférence effectué par un revêtement de pulvérisation (en anglais „spray coating") mais il peut également être réalisé par un trempage (an anglais „dip coating"), par une enduction centrifuge (en anglais „spin coating"), ou par un dépôt sous vide avec de la poudre. Selon une variante, la formation de l'oxyde 55 à l'étape de la figure 1i peut également être écartée, et la résine 160 peut être déposée directement sur la couche de travail structurée 30' (avec ou sans la couche d'oxyde 50) qui résulte après l'étape de la figure 1h.

[0024] Par la suite, dans la figure 1k, la couche de résine 160 est structurée, de préférence en utilisant une étape de photolithographie avec une source de lumière ultraviolette 80 ainsi que, par exemple, un masque d'exposition 170 tel qu'un photomasque. Un système de stepper et réticule peut également être utilisé pour l'étape de photolithographie. Dans l'exemple illustré, la couche 160 comprend une résine photosensible de type positif dont les parties 160E de la résine qui sont exposées à la lumière deviennent solubles dans un révélateur et les parties non exposées restent insolubles. Selon d'autres modes de réalisation, la résine peut être structurée par un faisceau laser ou d'électrons.

[0025] Comme illustré dans la figure 1k, les parties exposées 160E de la résine 160 se trouvent sur la couche d'oxyde enterrée 40 dans les régions éliminées 130 de la couche de travail structurée 30' entre les structures du composant horloger 90. De préférence, les parties exposées 160E de la résine 160 sur la couche d'oxyde enterrée 40 se trouvent vers le milieu des régions éliminées 130 mais ne s'étendent pas vers les bords de ces régions près des surfaces flancs 95 des composants horlogers 90 afin d'éviter le retrait de la résine sur ces surfaces flancs.

[0026] Dans la figure 1l, la couche de résine 160 est ouverte (voire elle est structurée) après avoir été développée par un révélateur, notamment un solvant qui élimine les parties exposées 160E de la résine sur la couche d'oxyde enterrée 40 par voie chimique. Ensuite, à la figure 1m, les parties de la couche oxyde enterrée 40 qui se trouvaient en dessous des parties exposées 160E de la résine sont aussi retirées de la surface supérieure de la couche de support 20 de la plaquette SOI 10, par exemple en employant une gravure humide ou à base de vapeur d'acide hydrofluorique (HF). Alternativement, une gravure DRIE de la couche d'oxyde de silicium peut être employée, et selon encore une autre alternative on peut utiliser une gravure plasma sélective avec les gaz CH_4/O_2 pour attaquer la couche d'oxyde enterrée 40. Après cette étape, on obtient une couche d'oxyde enterrée ajourée 40' avec des régions 140 dans lesquelles l'oxyde de la couche enterrée a été éliminé, exposant ainsi la couche de support 20 en dessous de ces régions éliminées 140.

[0027] La surface supérieure la couche de support 20 étant maintenant exposée en dessous de ces régions éliminées 140, à la figure 1n on commence une étape de gravure humide/chimique anisotrope du silicium de cette couche pour excaver une portion de la couche en dessous des composants horlogers 90. La gravure anisotrope permet d'éliminer le silicium plus rapidement dans la direction horizontale que dans la direction verticale (dans le sens de la figure) dans chaque région gravée 120 de la couche de support en dessous des régions éliminées 140. Les surfaces flancs gravées forment donc un angle comme illustré dans la figure, et en général cet angle varie en fonction de différents paramètres incluant notamment l'orientation cristalline du silicium. De préférence, la gravure de cette étape utilise un bain d'hydroxyde de potassium (KOH), mais alternativement elle peut utiliser par exemple un bain de d'hydroxyde de tétraméthylammonium (TMAH).

[0028] De préférence, cette étape de gravure continue afin que les régions gravées 120 dans lesquelles le silicium de la couche de support a été éliminé s'unissent pour former une cavité 125 s'étendant en dessous de chaque composant

horloger 90 comme illustré dans la figure 1o. On obtient donc une couche de support excavée 20' comprenant ces cavités 125 sur sa surface supérieure. Puisque la gravure anisotrope de la couche de support n'est pas strictement contrôlée, les cavités 125 n'ont typiquement pas une épaisseur uniforme, mais de préférence l'épaisseur maximale de chaque cavité e_{cav} est au plus égale à 50% de l'épaisseur e_{20} de la couche de support, et il est encore plus préféré que l'épaisseur maximale de chaque cavité e_{cav} est au plus égale à 25% de l'épaisseur e_{20} de la couche de support.

[0029] Puisque, à l'étape 1i, la couche d'oxyde 55 a été formée également sur les surfaces en silicium exposées de la couche de support 20, la gravure anisotrope attaque cette couche uniquement au travers des régions éliminées 140 de la couche d'oxyde enterrée ajourée 40', les autres surfaces de la couche de support 20 étant protégées par la couche d'oxyde 55.

[0030] A l'étape illustrée à la figure 1p, la partie restante de la couche de résine 160 est éliminée. Finalement, pour compléter la libération des composants horlogers, on effectue à la figure 1q une étape de désoxydation, ce qui élimine les couches d'oxyde 50 et 55 ainsi que les parties de la couche d'oxyde enterrée 40 restant entre chaque cavité 125 et le ou les composants horlogers 90 au-dessus de cette cavité. Cette étape de désoxydation peut être réalisée, par exemple, par une gravure par voie humide ou en phase vapeur à base d'acide fluorhydrique (HF). On obtient donc une couche d'oxyde enterrée structurée 40" dont une partie importante de la couche a été éliminée, mais qui comprend des parties 42, 44 (voir la figure 3) toujours présentes en dehors des zones des composants horlogers 90. Ces parties subsistantes 42, 44 de la couche d'oxyde enterrée structurée 40" gardent la liaison entre la couche de travail structurée 30' et la couche de support excavée 20'.

[0031] Les composants horlogers 90 sont alors libérés sur la plaquette SOI permettant la réalisation des étapes de fabrication subséquentes, comme le sera décrit ci-dessous, sur la quasi-totalité de la surface externe de ces composants. A cette fin, après la libération, les composants horlogers 90 ne sont supportés structurellement que par des ponts de liaison (illustrés schématiquement par le trait 35 dans la figure 1q; en réalité le pont s'étend sur toute l'épaisseur du composant) dans la couche de travail structurée 30'. De cette manière, les composants 90 restent attachés aux parties subsistantes de la couche de travail structurée 30'. Cela est illustré dans la figure 2 qui est une vue de dessus de la plaquette SOI 10 et notamment de la couche de travail structurée 30' après les étapes de fabrication des figures 1a-1q selon un mode de réalisation. A noter que dans la figure 2 les composants horlogers 90 se trouvent dans des zones de la couche qui sont simplement illustrés par des cercles vides afin de ne pas surcharger le dessin, mais la figure 2A donne une vue magnifiée d'une de ces zones montrant à titre d'exemple un spiral comme le composant horloger et son pont de liaison 35. La figure 3 est également une vue en section selon la ligne III-III de la figure 2 montrant une cavité 125 libérant chacun des composants horlogers 90 par le dessous. Malgré cette libération, la couche de travail structurée 30' est toujours soutenue par la couche de support excavée 20' de la plaquette SOI, ces deux couches étant liées ensemble par le biais des parties subsistantes 42, 44 de la couche d'oxyde enterrée structurée 40". Comme illustré aux figures 2 et 3, les parties subsistantes 44 situées à la périphérie de la plaquette 10 ont de préférence une largeur plus importante que les parties subsistantes 42 se trouvant entre les composants horlogers 90.

[0032] Dans le mode de réalisation ci-dessus, chaque composant horloger 90 de la plaquette a sa propre cavité 125, voire une cavité 125 dédiée à ce composant qui s'étend uniquement en dessous de ce composant. Selon un autre mode de réalisation, une seule cavité 125 peut s'étendre en dessous de plusieurs composants de la plaquette, la couche d'oxyde enterrée structurée 40" n'ayant pas des parties subsistantes 42 entres des composants situés au-dessus d'une même cavité. On peut même avoir une seule cavité 125 qui s'étend en dessous de tous les composants de la plaquette, et dans ce cas c'est uniquement des parties subsistantes périphériques 44 de la couche d'oxyde enterrée structurée 40" qui maintiennent la liaison entre la couche de travail structurée 30' et la couche de support excavée 20'.

[0033] Après l'étape de gravure de la couche de travail pour former les composants horlogers 90 (cf. la figure 1h), il est connu que les surfaces flancs 95 des motifs structurés des composants 90 possèdent une rugosité relativement importante. Dans le cadre d'une gravure type DRIE, cette rugosité se manifeste en forme d'une surface 95' avec des ondulations souvent appelées „scallops“ avec des pics 96 comme illustré à la partie gauche de la figure 1h. En fait, lors d'une gravure DRIE on alterne entre une phase de gravure du silicium et une phase de passivation ce qui résulte en la surface ondulée 95'. Après une gravure DRIE ou un autre type de gravure, la rugosité des surfaces 95 peut être réduite par une étape de lissage, ce qui renforce ces surfaces mécaniquement en limitant les amorces de rupture. Ce lissage peut notamment être effectué par une étape d'oxydation thermique suivie par une étape de désoxydation, constituée par exemple d'une gravure par voie humide ou en phase vapeur à base d'acide fluorhydrique (HF). De manière connue, lors de l'oxydation thermique, le silicium à la surface 95 est consommée, et cette consommation est généralement plus rapide vers les pics 96, ce qui résulte en une surface de silicium plus lisse après la désoxydation.

[0034] Comme mentionné ci-dessus, la formation de l'oxyde 55 sur les surfaces flancs 95 du composant 90 à l'étape de la figure 1i est de préférence effectuée par oxydation thermique. Cela permet, contrairement aux procédés de fabrication de l'art antérieur où le lissage est effectué après la libération des composants horlogers 90, de réaliser un lissage des flancs des composants horlogers durant la libération. Plus précisément, lors de l'étape de désoxydation à la figure 1q, on réalise non seulement la libération des composants horlogers 90 dans la plaquette SOI mais en même temps un lissage des surfaces flancs 95 de ces composants sur la plaquette 10. En réalisant le lissage et la libération avec une seule étape de désoxydation selon ce mode de réalisation de la présente invention, le nombre d'étapes dans le procédé de fabrication des composants horlogers 90 dans la plaquette SOI est favorablement réduit.

[0035] Après la libération des composants horlogers 90, si souhaité, une autre étape d'oxydation thermique suivie par une étape de désoxydation peut être réalisée pour effectuer un lissage au moins une nouvelle fois. D'autres étapes de fabrication subséquentes au lissage et à la libération peuvent aussi être effectuées. Par exemple, on peut effectuer une autre étape d'oxydation suivie par une désoxydation pour ajuster les dimensions des composants, ou on peut former une couche d'oxyde de silicium (SiO_2) permanente sur au moins une partie de toute la surface externe des composants horlogers 90. Dans le cadre d'un spiral ou d'un autre type de résonateur horloger, une telle couche d'oxyde permanente compense les variations du module d'Young de l'âme en silicium du composant horloger en fonction de la température. Par ailleurs, la formation d'une telle couche externe d'oxyde de silicium sur les composants horlogers de n'importe quel type peut également servir à renforcer ces composants mécaniquement. D'autres types de matériaux peuvent également être formés sur les composants horlogers 90, par exemple par un dépôt type ALD. Il est également possible d'effectuer une étape de pré-assemblage ou d'usinage des composants horlogers 90 lorsqu'ils sont toujours attachées à la plaquette SOI 10, comme par exemple pour assembler le composant à un axe, un tigeron, un piton ou une virole.

[0036] Les différentes étapes d'oxydation mentionnées ci-dessus peuvent être réalisées en plaçant la plaquette SOI dans un four à une température comprise entre 800°C et 1200°C et dans une atmosphère oxydante comprenant par exemple la vapeur d'eau ou du gaz de dioxygène (O_2). L'épaisseur de la couche d'oxyde formée dépend de manière connue de la durée de l'étape d'oxydation.

[0037] Une fois que les étapes de fabrication des composants horlogers 90 sur la plaquette SOI 10 sont complétées, les composants horlogers peuvent être détachées individuellement et par la suite assemblé et monté chacun dans une pièce d'horlogerie, par exemple dans un oscillateur ou dans un mécanisme d'échappement d'un mouvement horloger mécanique.

[0038] La présente invention n'est pas limitée aux modes de réalisation et variantes présentés et d'autres modes de réalisation et variantes apparaîtront clairement à l'homme du métier. Ainsi, les réalisations ci-dessus sont des exemples. Bien que la description se réfère à un ou plusieurs modes de réalisation et leurs variantes, ceci ne signifie pas nécessairement que chaque référence concerne le même mode de réalisation ou variante, ou que les caractéristiques s'appliquent seulement à un seul mode de réalisation ou variante. De simples caractéristiques de différents modes de réalisation et leurs variantes peuvent également être combinées et/ou interchangées pour fournir d'autres réalisations.

Revendications

1. Procédé de fabrication d'une pluralité de composants horlogers (90) présentant des surfaces flancs (95) dans une plaquette de fabrication de type SOI (10), la plaquette SOI (10) comprenant une couche de support (20) en silicium, une couche de travail (30) en silicium, et une couche d'oxyde enterrée (40) en oxyde de silicium séparant la couche de support (20) de la couche de travail (30), le procédé comprenant les étapes suivantes :
   (a) former les composants horlogers (90) en gravant des motifs dans la couche de travail (30) afin d'obtenir une couche de travail structurée (30') et des régions éliminées (130) de la couche de travail (30) autour des motifs gravés dans lesquelles le matériau de la couche de travail a été éliminé pour exposer la couche d'oxyde enterrée (40) en-dessous;
   (b) optionnellement, former une couche d'oxyde de silicium (55) au moins sur les surfaces flancs (95) des composants horlogers gravés à l'étape (a) ;
   (c) déposer une couche de résine (160) au moins sur la couche de travail structurée (30') et sur les parties exposées de la couche d'oxyde enterrée (40);
   (d) structurer la résine (160) en éliminant au moins une partie de la résine déposée sur la couche d'oxyde enterrée (40) ;
   (e) retirer des parties de la couche d'oxyde enterrée (40) se trouvant en dessous de la résine éliminée à l'étape (d), afin d'obtenir une couche d'oxyde enterrée ajourée (40') et des régions éliminées (140) de la couche d'oxyde enterrée (40), dans lesquelles le matériau de la couche enterrée (40) a été éliminé pour exposer la couche de support (20) en dessous ;
   (f) effectuer une gravure anisotrope du silicium dans la couche de support (20) au travers des régions éliminées (140) de la couche d'oxyde enterrée ajourée (40'), afin d'obtenir une couche de support excavée (20') ayant au moins une cavité (125) formée en dessous d'au moins un composant horloger (90) ; et
   (g) éliminer les parties de la couche d'oxyde enterrée (40) restant entre ladite au moins une cavité (125) et ledit au moins un composant horloger (90) agencé au-dessus de ladite cavité (125), afin d'obtenir une couche d'oxyde enterrée structurée (40") ayant des parties subsistantes (42, 44) liant toujours la couche de support excavée (20') à la couche de travail structurée (30').
2. Procédé selon la revendication précédente, dans lequel l'étape (a) de former les composants horlogers (90) est réalisée par une technique de gravure ionique réactive profonde.
3. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'étape (a) de former les composants horlogers (90) comprend la formation d'une couche d'oxyde structurée (50) sur la surface supérieure de la couche de travail (30) avant la gravure des motifs dans la couche de travail (30), et dans lequel l'étape (g) comprend également l'élimination de la couche d'oxyde structurée (50) sur la surface supérieure des composants horlogers (90).

4. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'étape (b) est réalisée.
5. Procédé selon la revendication 4, dans lequel l'étape (b) comprend également la formation d'une couche d'oxyde de silicium (55) sur la couche de support (20).
6. Procédé selon l'une des revendications 4 ou 5, dans lequel la formation de la couche d'oxyde de silicium (55) à l'étape (b) est réalisée par oxydation thermique.
7. Procédé selon la revendication 6, dans lequel l'élimination des couches d'oxydes à l'étape (g) permet de lisser les surfaces flancs (95) des composants horlogers (90) et de libérer les composants horlogers (90) dans la plaquette SOI (10), les composants horlogers (90) libérés n'étant supportés structurellement que par des ponts de liaison (35) dans la couche de travail structurée (30').
8. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la résine (160) déposée à l'étape (c) est une résine photosensible de type positif.
9. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le dépôt de la résine (160) à l'étape (c) est effectué par revêtement de pulvérisation.
10. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'étape (d) comprend une étape consistant à retirer la résine (160) sur la couche d'oxyde enterrée (40) vers le milieu des régions éliminées (130) de la couche de travail (30) sans retirer la résine (160) sur la couche d'oxyde enterrée (40) vers les bords desdites régions éliminées (130) près des surfaces flancs (95) des composants horlogers.
11. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel on retire lesdites parties de la couche d'oxyde enterrée (40) à l'étape (e) par une gravure humide ou à base de vapeur d'acide hydrofluorique (HF).
12. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel on retire lesdites parties de la couche d'oxyde enterrée (40) à l'étape (e) par une gravure DRIE.
13. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la gravure anisotrope à l'étape (f) utilise un bain d'hydroxyde de potassium (KOH) ou un bain de d'hydroxyde de tétraméthylammonium (TMAH).
14. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'étape (g) est réalisée par une gravure par voie humide ou en phase vapeur à base d'acide fluorhydrique (HF).
15. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel chaque composant horloger (90) de la plaquette SOI (10) a sa propre cavité (125) qui s'étend uniquement en dessous de ce composant horloger (90).
16. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'épaisseur maximale de chaque cavité (e_{cav}) est au plus égale à 50% de l'épaisseur (e_{20}) de la couche de support (20), et de préférence au plus égale à 25% de l'épaisseur (e_{20}) de la couche de support (20).
17. Composant horloger (90) réalisé par un procédé de fabrication selon l'une des revendications 1 à 16.
18. Piece d'horlogerie comprenant un composant horloger (90) selon la revendication 17.

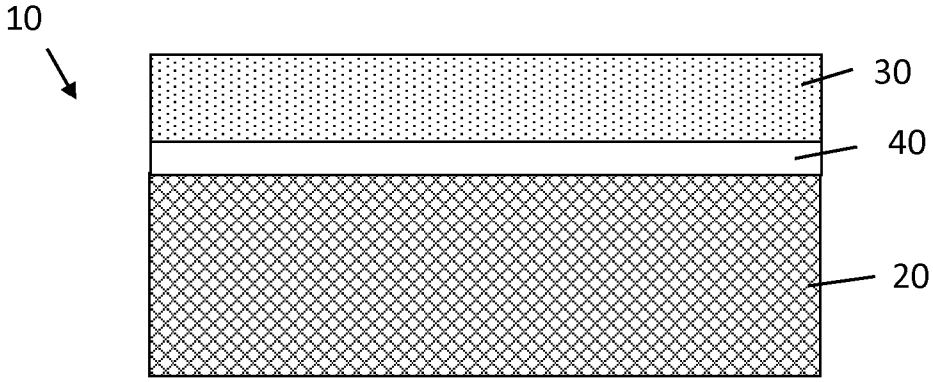


FIG. 1a

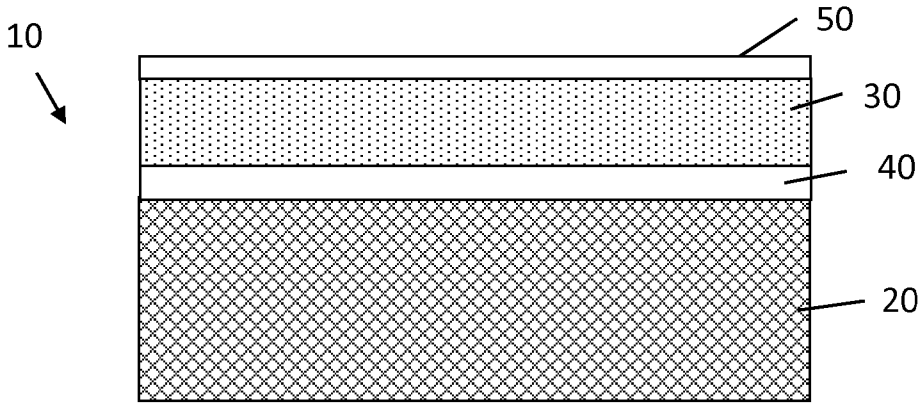


FIG. 1b

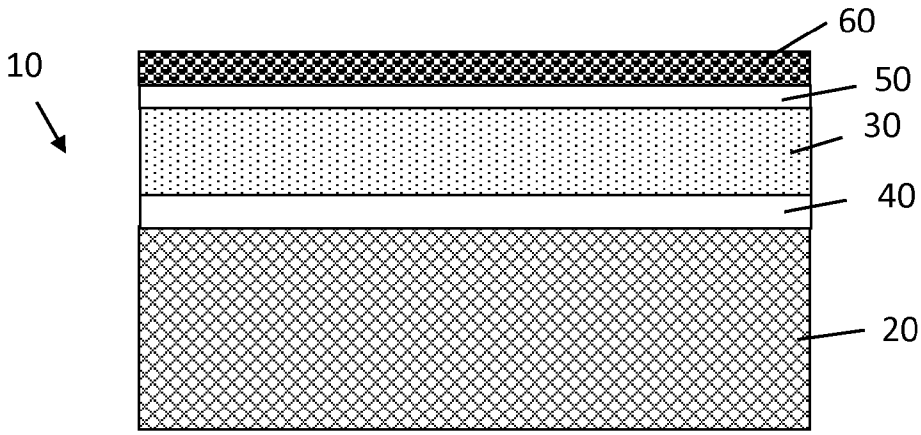


FIG. 1c

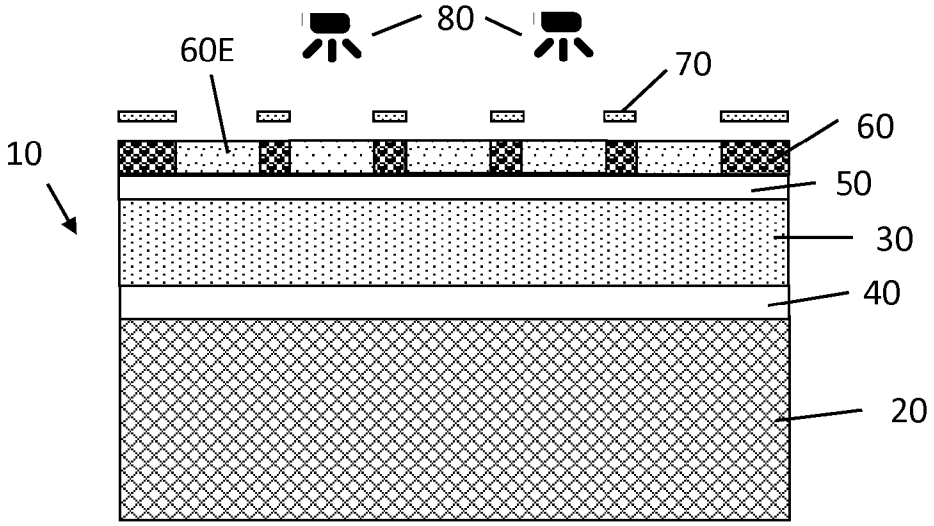


FIG. 1d

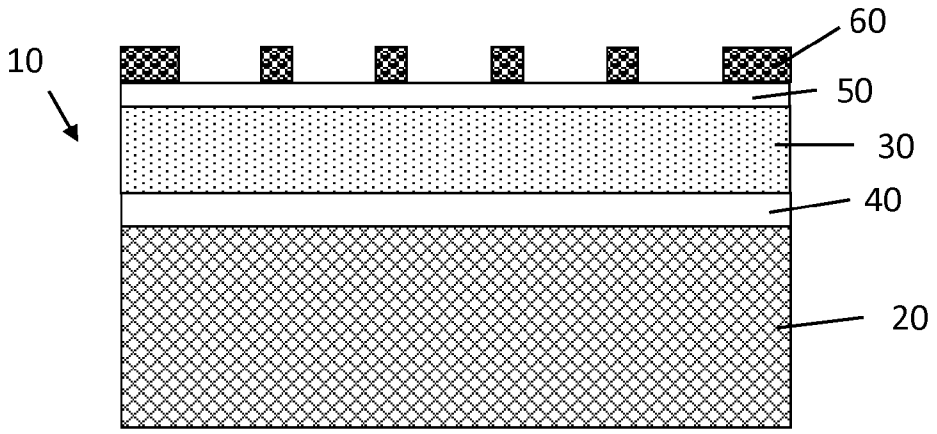


FIG. 1e

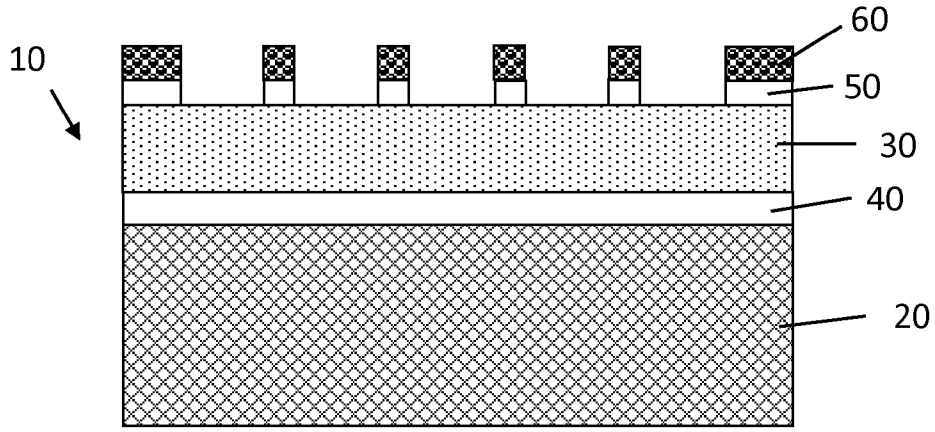


FIG. 1f

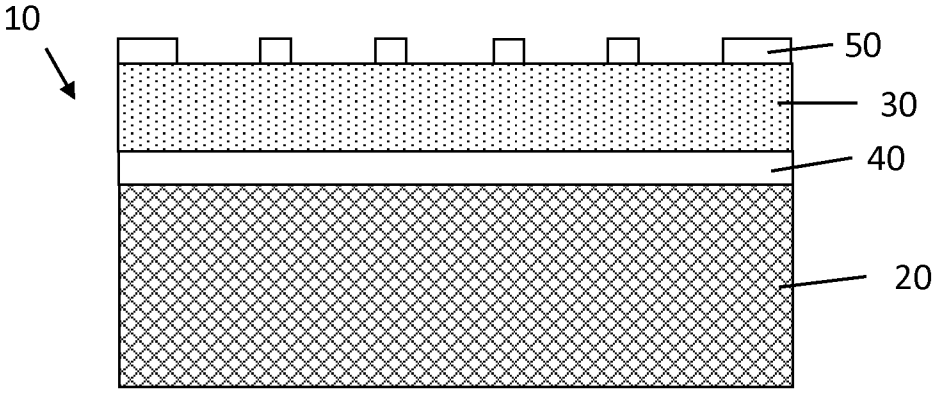


FIG. 1g

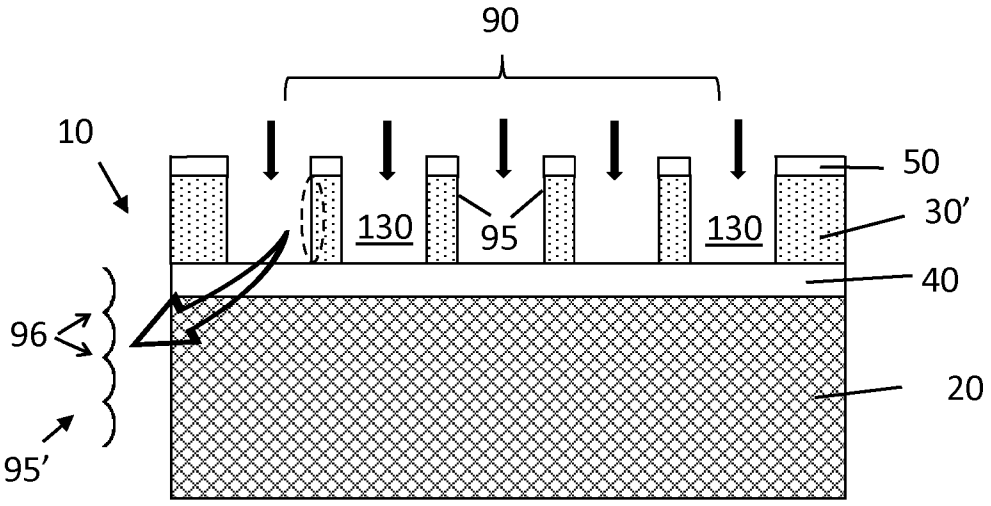


FIG. 1h

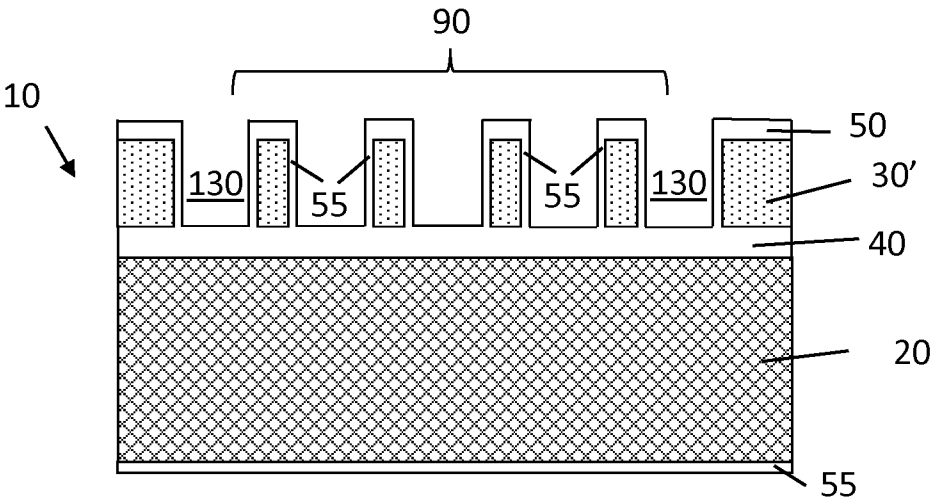


FIG. 1i

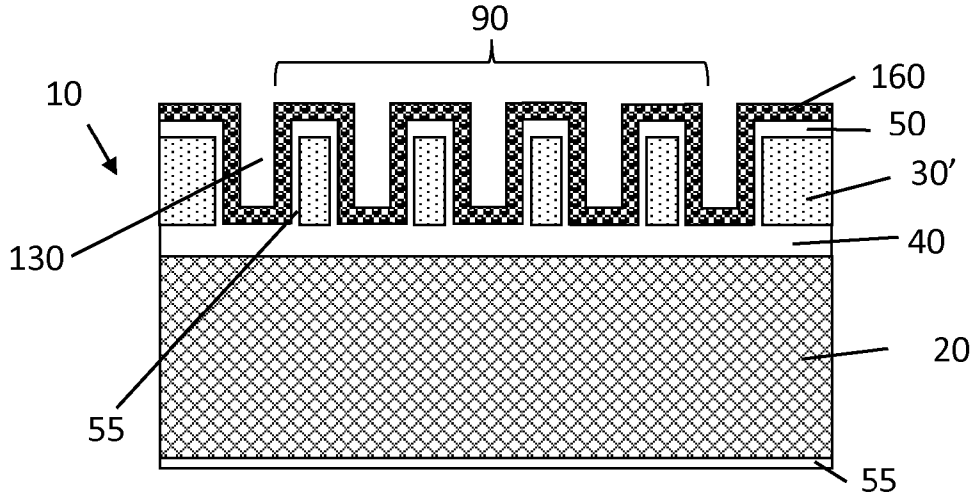


FIG. 1j

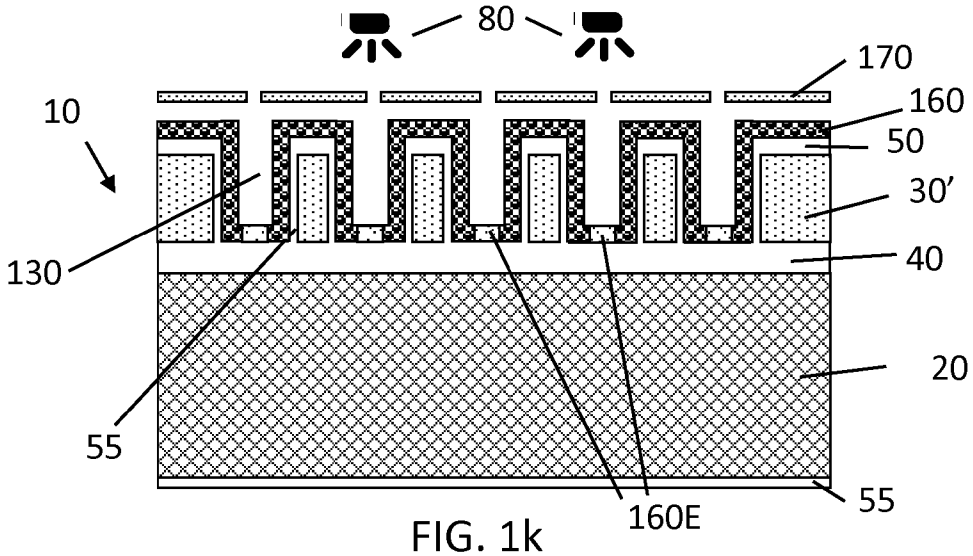


FIG. 1k

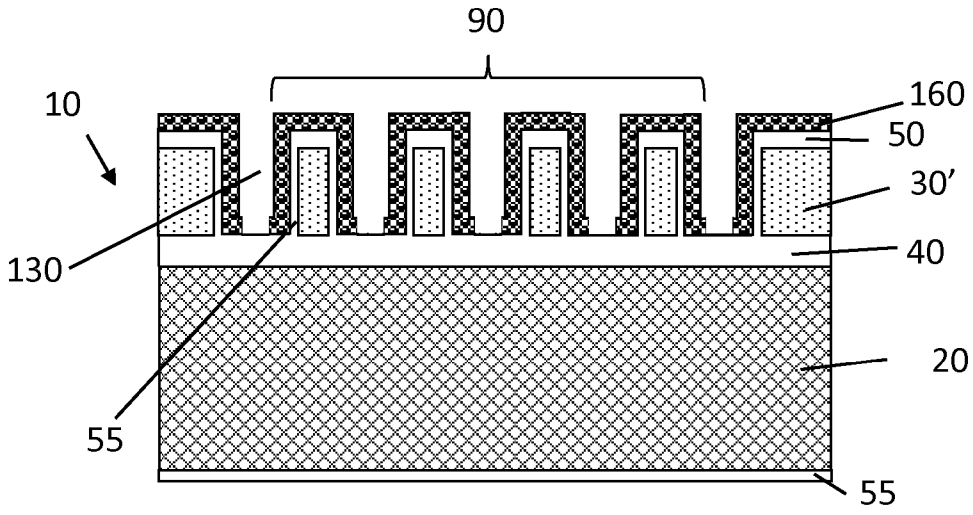


FIG. 1l

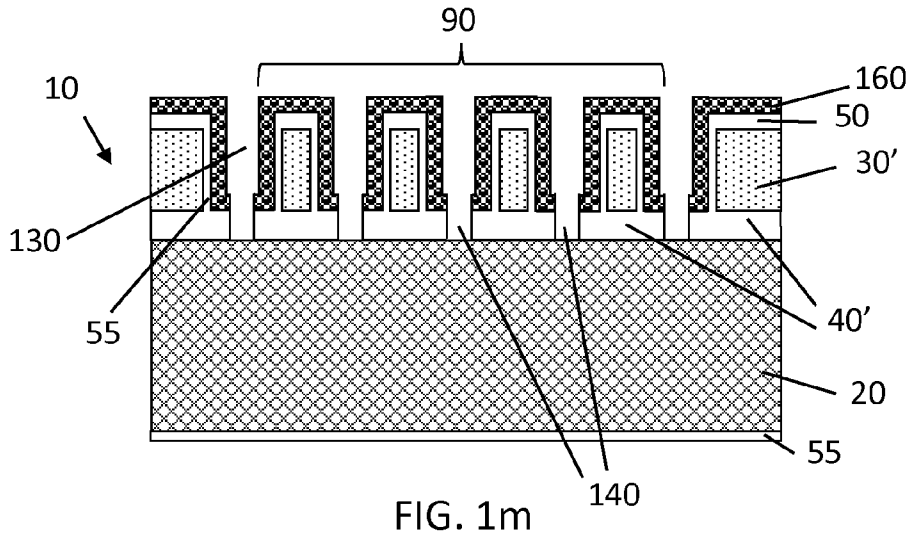


FIG. 1m

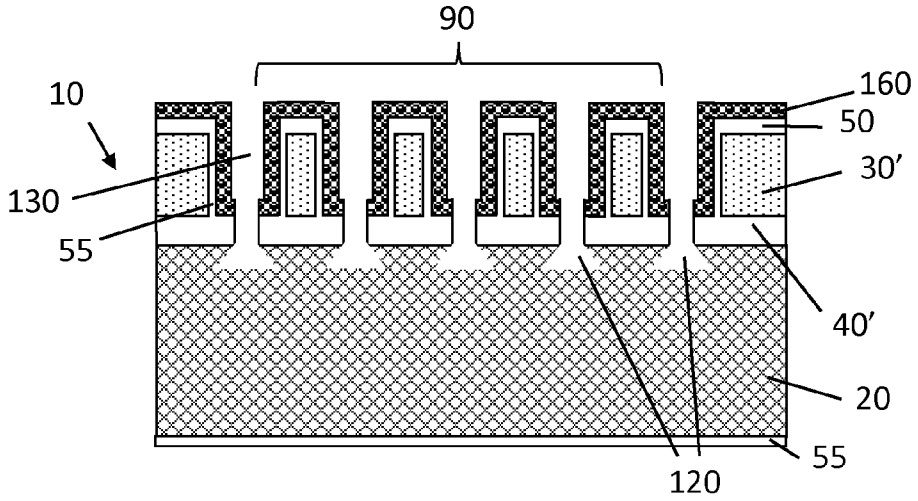


FIG. 1n

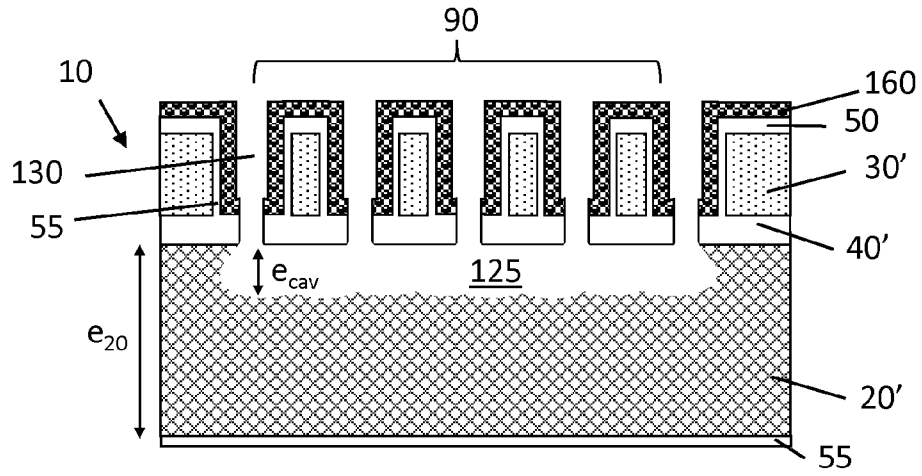


FIG. 1o

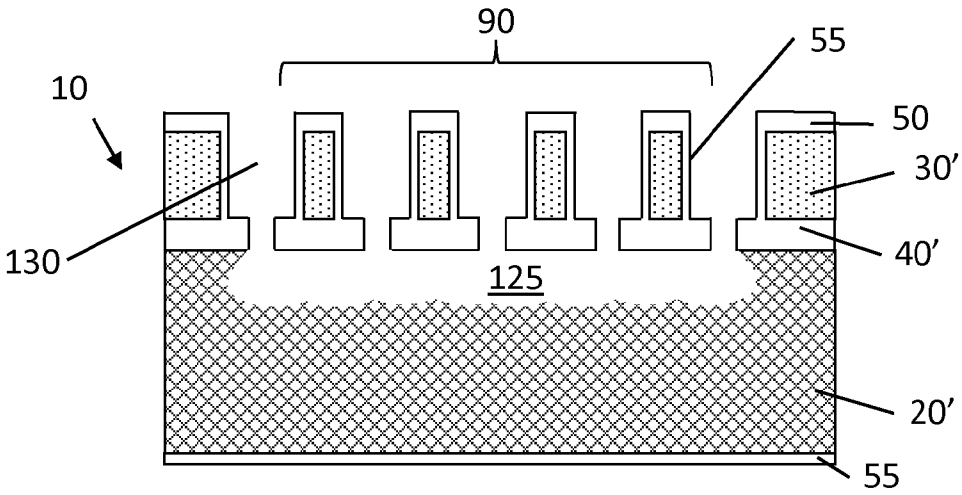


FIG. 1p

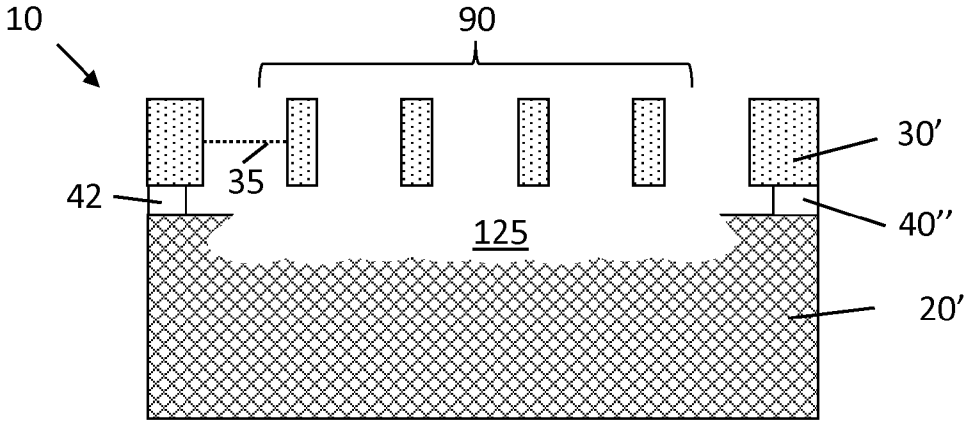


FIG. 1q

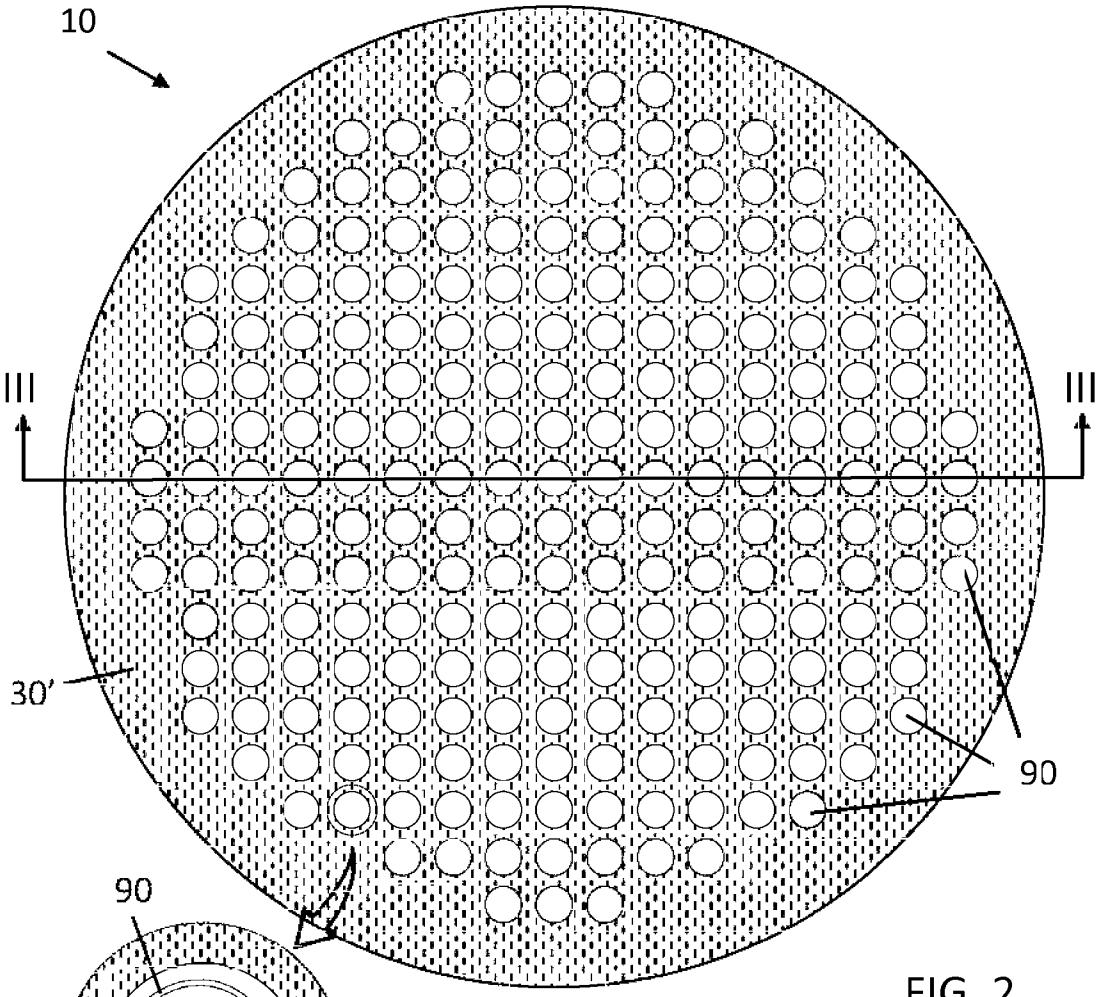


FIG. 2

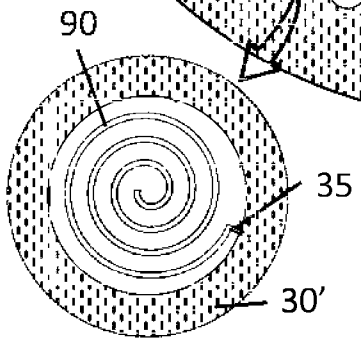


FIG. 2A

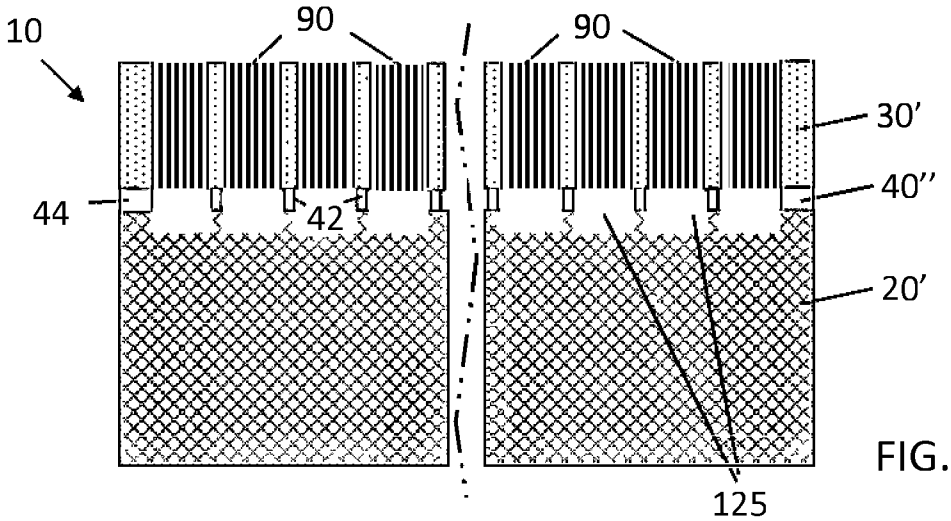


FIG. 3

TRAITE DE COOPERATION EN MATIERE DE BREVETS

RAPPORT DE RECHERCHE DE TYPE INTERNATIONAL

IDENTIFICATION DE LA DEMANDE INTERNATIONALE	COTE DU DOSSIER DU DEPOSANT OU DU MANDATAIRE
	BBS229439CH
Demande nationale n°	Date du dépôt
10412023	21-09-2023
Pays du dépôt	Date de priorité revendiquée
CH	
Déposant (Nom)	
Richemont International SA	
Date de la requête d'une recherche de type international	Numéro donné par l'administration chargée de la recherche internationale à la requête d'une recherche de type international
12-10-2023	SN84878

I. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE (en cas de plusieurs symboles de la classification, les indiquer tous)

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

Voir rapport de recherche

II. DOMAINES RECHERCHES

Documentation minimale consultée

Système de classification	Symboles de la classification
IPC	Voir rapport de recherche

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents font partie des domaines consultés

III. ☐ **IL A ETE ESTIME QUE CERTAINES REVENDICATIONS NE POUVAIENT FAIRE L'OBJET D'UNE RECHERCHE** (Observations sur la feuille supplémentaire)

IV. ☐ **ABSENCE D'UNITE DE L'INVENTION** (Observations sur la feuille supplémentaire)

Form PCT/ISA 201 A (11/2000)

RAPPORT DE RECHERCHE DE TYPE INTERNATIONAL

Demande de recherche No
CH 10412023

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
INV. G04B1/14 B81C99/00 G03F7/00 G04B13/02 G04B15/14
G04B17/06 G04B19/04
ADD.
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE
Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
G04B G03F B82B B81C

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)
EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie °	Documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	EP 3 764 169 B1 (PATEK PHILIPPE SA GENEVE [CH]) 15 mars 2023 (2023-03-15)	17,18
A	* alinéas [0033], [0034], [0037], [0038]; figures 12, 17-23 *	1-16
X	WO 2021/053501 A1 (RICHEMONT INT SA [CH]; TRONIC S MICROSYSTEMS S A [FR]) 25 mars 2021 (2021-03-25)	17,18
A	* alinéas [0014], [0022], [0024]; figures 3G, 3D *	1-16
X	"Composants horlogers en silicium ED - Darl Kuhn", IP.COM, IP.COM INC., WEST HENRIETTA, NY, US, 2 septembre 2022 (2022-09-02), XP013194439, ISSN: 1533-0001	17,18
A	* page 3 - page 5 *	1-16

☐ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

° Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date
"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
"P" document publié avant la date de dépôt, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée
"T" document ultérieur publié après la date de dépôt ou la date de priorité et n'appartenenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
"X" document particulièrement pertinent;; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
"Y" document particulièrement pertinent;; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche de type international a été effectivement achevée	Date d'expédition du rapport de recherche de type international
25 janvier 2024	06-02-2024
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Fonctionnaire autorisé Scordel, Maxime

1

Formulaire PCT/ISA/201 (deuxième feuille) (Janvier 2004)

RAPPORT DE RECHERCHE DE TYPE INTERNATIONAL

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande de recherche n
CH 10412023

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 3764169	B1 15-03-2023	AUCUN	
WO 2021053501	A1 25-03-2021	CH 716605 A1	31-03-2021
		CN 114730154 A	08-07-2022
		EP 4031936 A1	27-07-2022
		JP 2022547618 A	14-11-2022
		US 2022350255 A1	03-11-2022
		WO 2021053501 A1	25-03-2021

Formulaire PCT/ISA/201 (annexe - familles de brevets) (Janvier 2004)