

CONFÉDÉRATION SUISSE
INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) **CH** **719 240 A2**

Demande de brevet pour la Suisse et le Liechtenstein

Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein

(51) Int. Cl.: **G04C 11/00** (2006.01)
H10N 30/20 (2023.01)
G04C 3/04 (2006.01)
H10N 30/03 (2023.01)
H10N 30/30 (2023.01)

(12) **DEMANDE DE BREVET**

(21) Numéro de la demande: 070703/2021

(22) Date de dépôt: 10.12.2021

(43) Demande publiée: 15.06.2023

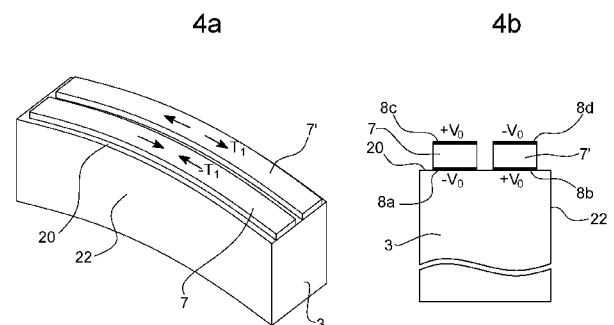
(71) Requéérant:
The Swatch Group Research and Development Ltd,
Rue des Sors 3
2074 Marin (CH)

(72) Inventeur(s):
Alexandre Didier, 3235 Erlach (CH)
Elias Laforge, 2000 Neuchâtel (CH)
François Gueissaz, 2036 Cormondrèche (CH)

(74) Mandataire:
ICB Ingénieurs Conseils en Brevets SA,
Faubourg de l'Hôpital 3
2001 Neuchâtel (CH)

(54) **Ressort spiral piézoélectrique, et procédé de fabrication du ressort spiral.**

(57) L'invention concerne un ressort spiral piézoélectrique (3) et ses procédés de fabrication, pour un circuit d'autorégulation (10) d'une fréquence d'oscillation d'un système mécanique oscillant (3) ou un circuit de récupération d'énergie ou un circuit moteur pour l'actionnement du mouvement ou son entretien automatique. Le ressort spiral piézoélectrique (3) comprend au moins une couche piézoélectrique (7, 7') disposée sur une face de dessus (20) ou de dessous d'un certain nombre de spires du ressort en plan, et au moins deux paires d'électrodes (8a, 8b, 8c, 8d) où les électrodes de chaque paire sont disposées sur deux faces opposées d'une même couche piézoélectrique ou respectivement de deux couches piézoélectriques de manière à appliquer une tension de polarisation inverse sur chaque paire d'électrodes.



Description

Domaine technique de l'invention

[0001] L'invention concerne un ressort spiral piézoélectrique pour un circuit d'autorégulation de la fréquence d'oscillation d'un système mécanique oscillant ou un circuit de récupération d'énergie ou un circuit moteur pour l'actionnement du mouvement ou son entretien automatique.

[0002] L'invention concerne également un procédé de fabrication d'un ressort spiral piézoélectrique.

Etat de la technique

[0003] Dans le domaine de l'horlogerie et d'un point de vue mécanique, le système mécanique oscillant peut être un balancier sur lequel est monté un ressort spiral, dont une extrémité est fixée à l'axe de rotation du balancier et l'autre extrémité est fixée sur un élément fixe d'une platine. Le système mécanique est maintenu en oscillation par l'intermédiaire d'une source d'énergie généralement mécanique, qui peut être un barillet entraînant un train d'engrenages avec une roue d'échappement coopérant avec une ancre rotative. Le balancier avec le ressort spiral couplé à l'échappement peut ainsi former un organe régulateur d'un mouvement d'horlogerie. Une place importante dans la boîte de montre est utilisée avec cette régulation totalement mécanique ce qui peut constituer un inconvénient dans certains cas.

[0004] Le brevet FR 2 119 482 décrit un système mécanique oscillant d'un élément piézoélectrique. Cet élément piézoélectrique est disposé de préférence sur un ressort spiral relié à un balancier. Pour ce faire, il est précisé le dépôt de pellicules de matière piézoélectrique (PZT) sur la majeure partie de la longueur du ressort et sur une face intérieure et une face extérieure dudit ressort métallique. Un convertisseur de tension permet de fournir une tension alternative à l'élément piézoélectrique pour générer alternativement une force de compression et une force d'extension au ressort afin de régler l'oscillation du balancier relié au ressort spiral. Dans ce document de brevet, il est prévu de disposer des électrodes sur la longueur du ressort et sur chaque face latérale, ce qui peut compliquer sa réalisation, ce qui constitue un inconvénient.

[0005] Les figures 1 et 2 de l'art antérieur représentent un dispositif 1, qui comprend un système mécanique oscillant 2, 3 et un circuit d'autorégulation 10 de la fréquence d'oscillation fosc du système mécanique oscillant comme décrit dans le brevet EP 2 590 035 B1. Dans une montre mécanique, le système mécanique oscillant comprend un balancier 2, qui est formé d'un anneau métallique relié par exemple par trois bras 5 à un axe de rotation 6, et un ressort spiral 3, sur lequel est disposé un élément piézoélectrique ou un élément à polymère électro-actif. Une première extrémité 3a du ressort spiral 3 est maintenue fixe par un piton 4 d'un pont de balancier. Ce pont de balancier est fixé à la platine du mouvement de la montre. Une seconde extrémité 3b du ressort spiral 3 est fixée directement sur l'axe de rotation 6 du balancier. Des couches piézoélectriques ou à polymère électro-actif 23, 23' sont déposées sur deux faces latérales de la bande métallique 24, ce qui peut compliquer sa réalisation.

[0006] Comme représenté en figure 3 de l'art antérieur, le brevet EP 3 629 103 B1 décrit un ressort spiral piézoélectrique 70 d'une pièce d'horlogerie. Le ressort spiral 70, représenté en coupe transversale, comprend un corps central 72 en silicium, une couche d'oxyde de silicium 74 déposée en surface du corps central pour compenser thermiquement le ressort spiral, une couche conductrice 76 déposée sur la couche d'oxyde de silicium, et un matériau piézoélectrique déposé sous forme d'une couche piézoélectrique 78 sur la couche conductrice 76. Deux électrodes 20a et 22a sont agencées sur la couche piézoélectrique 78 respectivement des deux côtés latéraux du ressort spiral. Une première partie 80a et une seconde partie 80b de la couche piézoélectrique s'étendent respectivement sur deux côtés latéraux du corps central 72 et présentent des structures cristallographiques respectives qui sont symétriques relativement à un plan médian 84 parallèle à ces deux côtés latéraux. Dans les deux parties latérales 80a et 80b, la couche piézoélectrique présente deux mêmes axes de polarisations piézoélectriques respectifs 82a, 82b qui sont perpendiculaires à la couche piézoélectrique et de sens opposés. La réalisation d'une telle structure de ressort spiral piézoélectrique est compliquée et longue à réaliser, ce qui constitue un inconvénient.

[0007] Dans l'état de l'art, il y a plusieurs difficultés techniques pour la réalisation de couches piézoélectriques et d'électrodes de contact sur un ressort spiral par exemple. On peut rencontrer un problème lié à l'effet d'ombrage, c'est-à-dire à tout dépôt d'une ou plusieurs couches conduisant à des gradients d'épaisseur. Il peut survenir l'apparition de court-circuits au bas des spires en fonction d'une épaisseur de couche piézoélectrique insuffisante. Cela conduit également à des restrictions sur les dimensions du ressort spiral, car il faut prévoir un espace entre les spires et un rapport d'aspect suffisamment important pour atténuer l'effet d'ombrage.

[0008] Dans le cas d'un dépôt par jet ou pulvérisation de matière („sputtering“ en terminologie anglaise), les couches piézoélectriques peuvent présenter une texturation déviée d'un angle de plusieurs dizaines de degrés par rapport à la normale au flanc. L'effet piézoélectrique s'en trouve amoindri, car seule la projection sur la direction du champ électrique y contribue.

[0009] Il est encore à noter, que la fréquence de résonance du balancier spiral est sensible à la raideur du ressort spiral, qui dépend de son épaisseur élevée au cube. La reproductibilité typique d'un dépôt impose un état final de mise à la fréquence après le dépôt des couches piézoélectriques. De plus, les dépôts par jet de matière ont une variation d'épaisseur

de plusieurs pourcents sur la surface des substrats, ce qui complique la correction précise de l'épaisseur d'une couche déposée.

[0010] Il est souvent utilisé des procédés de fabrication non standards d'un ressort spiral, car il faut déposer les couches sur des plaquettes structurées et structurer des électrodes sur les flancs sans endommager lesdites couches.

Résumé de l'invention

[0011] L'invention a donc pour but de fournir un ressort spiral piézoélectrique facile à réaliser pour un circuit d'autorégulation de la fréquence d'oscillation d'un système mécanique oscillant pour réguler précisément la fréquence d'oscillation du système mécanique oscillant, avec un nombre restreint de composants et pour pallier aux inconvénients susmentionnés de l'état de la technique. Le ressort spiral piézoélectrique est prévu également pour un circuit de récupération d'énergie ou pour un circuit moteur pour l'actionnement du mouvement ou son entretien automatique.

[0012] A cet effet, l'invention concerne un ressort spiral piézoélectrique pour un circuit d'autorégulation de la fréquence d'oscillation d'un système mécanique oscillant ou un circuit de récupération d'énergie ou un circuit moteur pour l'actionnement du mouvement ou son entretien automatique, qui comprend les caractéristiques mentionnées dans la revendication indépendante 1.

[0013] Des formes particulières du ressort spiral sont définies dans les revendications dépendantes 2 à 13.

[0014] Un avantage d'un tel ressort spiral piézoélectrique selon l'invention réside dans le fait qu'il peut être réalisé facilement, car le dépôt de la couche piézoélectrique est bien contrôlable si on la dépose sur une face de dessus, voire de dessous. Il est de plus facile d'augmenter l'épaisseur des couches piézoélectriques ou d'augmenter leur longueur en faisant le dépôt sur les faces de dessus ou de dessous.

[0015] Avantagusement, il n'est pas touché aux arêtes des bords de la spire du ressort, qui sont susceptibles de causer des problèmes de fissures de la couche piézoélectrique, comme tout est déposé sur la face de dessus, voire de dessous les problèmes de fissures sont réduits.

[0016] Un autre avantage d'effectuer le dépôt d'une couche piézoélectrique sur une face de dessus est qu'on bénéficie d'une meilleure orientation cristalline normalement perpendiculaire sur la face de dessus que sur les faces latérales où l'orientation est inclinée. L'homogénéité du dépôt sur l'ensemble de la plaquette (wafer) et sur chaque spire est bien plus grande. Cela ne dépend pas de l'espace entre les différentes spires du ressort spiral. Par contre pour le dépôt d'une couche piézoélectrique sur les faces latérales, plus l'espace entre les spires est faible et plus il est difficile de déposer une telle couche sur ces faces latérales. Dans ce cas, il y a un effet d'ombrage pour le dépôt des couches sur les faces latérales qui peuvent être également trop faibles en épaisseur et où il peut apparaître des court-circuits pour une couche d'épaisseur insuffisante. C'est donc un avantage d'effectuer le dépôt d'une couche piézoélectrique sur une face de dessus pour le contrôle de la justesse de fabrication, et on limite la différence entre les designs et la réalité.

[0017] Un autre avantage est qu'il est plus facile maintenant de déposer des couches piézoélectriques en matériaux difficilement structurables sur la face de dessus par rapport aux faces latérales. De manière générale, un procédé de fabrication global par le dessus, comprenant la structuration des couches et la gravure et protection des structures, est plus aisé qu'une structuration non-standard des flancs des spires.

[0018] A cet effet, l'invention concerne également un procédé de fabrication d'un ressort spiral piézoélectrique, qui comprend les caractéristiques de l'une des revendications indépendantes 14 et 15.

[0019] Selon le procédé préconisé de l'invention, on peut partir d'un support sous forme de plaque de base par exemple en SOI (Silicon-on-Insulator) comme première étape. Après cette première étape, on peut déjà réaliser la gravure du ressort comme expliqué plus en détail ci-après ou déjà de réaliser avant la gravure de la première couche de silicium, le dépôt des électrodes, de la couche piézoélectrique et des autres électrodes au-dessus de la couche piézoélectrique, ainsi que leur structuration.

Brève description des figures

[0020] Les buts, avantages et caractéristiques du ressort spiral piézoélectrique pour un circuit d'autorégulation de fréquence d'oscillation d'un système mécanique oscillant ou un circuit de récupération d'énergie ou un circuit moteur pour l'actionnement du mouvement ou son entretien automatique, et le procédé de fabrication du ressort spiral, apparaîtront mieux dans la description suivante sur la base de formes d'exécution non limitatives illustrées par les dessins sur lesquels :

la figure 1 représente de manière simplifiée un dispositif, qui comprend un système mécanique oscillant et un circuit d'autorégulation de la fréquence d'oscillation du système mécanique oscillant selon l'art antérieur,

la figure 2 représente une portion d'un ressort spiral du système mécanique oscillant, qui comprend un élément piézoélectrique du dispositif selon l'art antérieur,

la figure 3 représente une coupe transversale d'une spire d'un autre type de ressort spiral piézoélectrique selon l'art antérieur,

les figures 4a et 4b représentent une vue partielle tridimensionnelle d'une portion de spire du ressort spiral piézoélectrique et une coupe transversale de cette spire d'une première forme d'exécution du ressort spiral piézoélectrique selon l'invention,

la figure 5 représente une coupe transversale d'une spire d'une seconde forme d'exécution du ressort spiral piézoélectrique selon l'invention,

la figure 6 représente une coupe transversale d'une spire d'une troisième forme d'exécution du ressort spiral piézoélectrique selon l'invention,

la figure 7 représente une coupe transversale d'une spire d'une quatrième forme d'exécution du ressort spiral piézoélectrique selon l'invention, et

la figure 8 représente une formation de spires du ressort spiral piézoélectrique sur une base de substrat et avec couverture d'une couche piézoélectrique sur les spires pour définir la différence entre un dépôt de la couche sur une face de dessus, selon la présente invention, par rapport à une couche sur une face latérale.

Description détaillée de l'invention

[0021] Les figures 4a et 4b représentent une vue partielle tridimensionnelle d'une portion de spire du ressort spiral piézoélectrique 3 et une coupe transversale de cette spire d'une première forme d'exécution du ressort spiral piézoélectrique 3. Généralement le ressort spiral 3 comprend plusieurs spires et est relié à un balancier non représenté pour constituer un système mécanique oscillant. Une première extrémité du ressort spiral est fixée à un pont de balancier, alors que la seconde extrémité est fixée sur l'axe de balancier. Le ressort spiral 3 se présente comme dans un plan entre ses deux extrémités.

[0022] Le ressort spiral piézoélectrique 3 comprend dans cette première forme d'exécution, sur une face de dessus du ressort spiral, deux paires d'électrodes 8a, 8b, 8c, 8d dont les premières électrodes 8a et 8b des deux paires d'électrodes côte à côte sont fixées directement sur la face de dessus du ressort spiral. La première couche piézoélectrique 7 est fixée entre la première électrode 8a et la seconde électrode 8c de la première paire d'électrodes, alors que la seconde couche piézoélectrique 7' distincte de la première couche est fixée entre la première électrode 8b et la seconde électrode 8d de la seconde paire d'électrodes.

[0023] De préférence, il est réalisé une gravure du silicium sur une plaquette SOI (ou en Quartz) pour obtenir la forme du ressort spiral 3 avec en dessous l'isolant, qui comprend d'une part une couche d'oxyde SiO₂ et d'autre part une plaque de silicium de base. La plaquette SOI ou quartz peut être avantageusement recouverte d'une couche isolante du type SiO₂, d'une épaisseur de l'ordre de 500 nm, pour éviter toute interférence entre l'activation des couches piézoélectriques et le substrat utilisé pour la réalisation du ressort spiral 3. La plaquette SOI peut-être d'une épaisseur de l'ordre 500 µm. Selon une variante de réalisation du procédé de fabrication du ressort spiral piézoélectrique, une fois que le contour du ressort spiral 3 est obtenu après gravure, il peut être réalisé le dépôt et la structuration des électrodes 8a, 8b, 8c, 8d et des couches piézoélectriques 7, 7' sur une face de dessus du ressort spiral.

[0024] Il peut aussi être prévu de réaliser le ressort spiral 3 sur une plaquette en verre. Dans ces conditions, il est effectué une étape de gravure chimique assistée par laser de la plaquette en verre pour l'obtention du ressort spiral 3. D'autres types de substrats peuvent être envisagés, comme la céramique ou les composites en adaptant les méthodes de fabrication du ressort spiral.

[0025] La première électrode 8a de la première paire d'électrodes et la première électrode 8b de la seconde paire d'électrodes sont disposées ou déposées sur la face de dessus 20 du ressort spiral piézoélectrique 3 en plan. Les premières électrodes 8a et 8b sont régulièrement espacées l'une de l'autre et suivent chacune la forme de spires depuis une première extrémité du ressort spiral et en direction de la seconde extrémité du ressort spiral. Les premières électrodes 8a et 8b des deux paires d'électrodes sont d'une longueur sensiblement équivalente et sur une partie de la longueur du ressort spiral depuis la première extrémité dudit ressort spiral. De préférence, la longueur des premières électrodes 8a, 8b des deux paires d'électrodes s'étend de la première extrémité à une seconde extrémité du ressort spiral piézoélectrique 3.

[0026] La première couche piézoélectrique 7 est déposée directement sur la première électrode 8a de la première paire et de préférence de forme équivalente à ladite première électrode 8a sur au moins une partie de la longueur du ressort spiral piézoélectrique 3. La seconde couche piézoélectrique 7' est déposée directement sur la première électrode 8b de la seconde paire d'électrodes et de préférence de forme équivalente à ladite première électrode 8b sur au moins une partie de la longueur du ressort spiral piézoélectrique 3.

[0027] Finalement, la seconde électrode 8c de la première paire d'électrodes est disposée ou déposée directement sur la première couche piézoélectrique 7 sur une face opposée à celle du contact de la première électrode 8a avec la première couche piézoélectrique 7. La seconde électrode 8d de la seconde paire d'électrodes est disposée ou déposée directement

sur la seconde couche piézoélectrique 7' sur une face opposée à celle du contact de la première électrode 8b avec la seconde couche piézoélectrique 7'. La forme et la longueur de chaque seconde électrode 8c, 8d sont équivalentes à la forme et la longueur de chaque première électrode 8a, 8b dans cette première forme d'exécution.

[0028] Il est prévu deux variantes de procédé de fabrication du ressort spiral piézoélectrique. Comme le ressort spiral 3 provient d'une plaquette de silicium (SOI) ou d'une plaquette de Quartz, il peut être envisagé tout d'abord de graver le silicium ou le quartz pour obtenir la base du ressort spiral 3. Par la suite, les électrodes 8a, 8b, 8c, 8d et les couches piézoélectriques 7, 7' sont déposées sur une face de dessus, ou de dessous du ressort spiral 3 déjà structuré. Dans le cas d'une plaquette en verre, il peut être tout d'abord découpé par laser assisté chimiquement ou non depuis le dessus de la plaquette la base du ressort spiral 3.

[0029] Selon une variante de réalisation, les électrodes 8a, 8b, 8c, 8d et les couches piézoélectriques 7, 7' peuvent déjà être déposées sur la plaquette de silicium ou de quartz avant structuration, c'est-à-dire avant une gravure par un procédé DRIE pour obtenir le ressort spiral ou avant une gravure chimique assistée par laser depuis le dessus de la plaquette en verre pour obtenir le ressort spiral 3. Il sera donné par la suite de la description plus de détails correspondant au procédé de fabrication du ressort spiral piézoélectrique 3 selon les deux variantes sommairement présentées.

[0030] Comme montré à la figure 4a, le circuit d'autorégulation permet d'appliquer une tension d'adaptation pour générer une contrainte de compression -T1 sur une couche piézoélectrique 7 ou une tension d'adaptation inverse sur l'autre couche piézoélectrique 7' générant une contrainte d'extension T1 continue ou par périodes temporelles déterminées. Ceci permet de réguler la fréquence d'oscillation du système mécanique oscillant.

[0031] Tout d'abord une première électrode 8a d'une première paire d'électrodes et une première électrode 8b d'une seconde paire d'électrodes sont disposées ou structurées les deux sur une face de dessus 20 et de préférence sur une grande partie de la longueur du ressort spiral 3 au moins la moitié de la longueur et par exemple sur toute la longueur du ressort spiral 3 s'il est déjà réalisé sur la base de la plaquette. Les premières électrodes 8a et 8b sont disposées l'une à côté de l'autre avec un espacement prédéfini par exemple sur toute la longueur du ressort spiral 3. Aucune électrode n'est déposée sur chaque face latérale 22.

[0032] Une première couche piézoélectrique 7 est par la suite déposée puis structurée sur la première électrode 8a de la première paire d'électrodes. De préférence, la première couche piézoélectrique est structurée à la dimension latérale et à la longueur de la première électrode 8a de la première paire d'électrodes. Une seconde couche piézoélectrique 7' peut être déposée ou structurée sur la première électrode 8b de la seconde paire d'électrodes en même temps que la première couche piézoélectrique 7 ou après la réalisation de la première couche piézoélectrique 7. De préférence, la seconde couche piézoélectrique 7' est structurée à la dimension latérale et à la longueur de la première électrode 8b de la seconde paire d'électrodes.

[0033] Une fois que les première et seconde couches piézoélectriques 7, 7' sont bien structurées sur les premières électrodes 8a, 8b des deux paires d'électrodes, une seconde électrode 8c de la première paire d'électrodes est déposée ou structurée sur la première couche piézoélectrique 7 en regard de la première électrode 8a de la première paire d'électrodes. La seconde électrode 8c est de forme et de dimension équivalente à la première électrode 8a de la première paire d'électrodes. Une seconde électrode 8d de la seconde paire d'électrodes est déposée ou structurée sur la seconde couche piézoélectrique 7' en regard de la première électrode 8b de la seconde paire d'électrodes. La seconde électrode 8d est de forme et de dimension équivalente à la première électrode 8b de la seconde paire d'électrodes.

[0034] Une fois que le ressort spiral piézoélectrique 3 est terminé, il peut être monté dans un système mécanique oscillant. Les deux paires d'électrodes dans cette forme d'exécution sont inversement polarisées et alternativement par une source de tension notamment pour entretenir un mouvement du système oscillant pour l'oscillation du ressort spiral piézoélectrique. Pour ce faire, la première électrode 8a de la première paire d'électrodes peut être reliée à la seconde électrode 8d de la seconde paire d'électrodes. La première électrode 8b de la seconde paire d'électrodes peut être reliée à la seconde électrode 8c de la première paire d'électrodes. La première électrode 8a et la seconde électrode 8d peuvent être reliées à une première borne de connexion disposée à une première extrémité du ressort spiral piézoélectrique 3. La première électrode 8b et la seconde électrode 8c peuvent être reliées à une seconde borne de connexion à la première extrémité du ressort spiral piézoélectrique 3.

[0035] Il est à noter encore, qu'il peut être prévu de déposer uniquement une première couche piézoélectrique 7 sur les deux premières électrodes 8a, 8b des deux paires d'électrodes. Après cela, une séparation en deux couches piézoélectriques 7, 7' peut être effectuée comme présentée sur chaque première électrode 8a, 8b des deux paires d'électrodes.

[0036] La connexion électrique du ressort spiral piézoélectrique 3 peut être réalisée sur le dessus, avec des bornes de connexion définies notamment en même temps que les dépôts des électrodes 8a, 8b, 8c, 8d et de la ou des couches piézoélectriques 7, 7'. De préférence, deux bornes de connexion à une première extrémité du ressort spiral piézoélectrique 3 sont prévues pour être reliées aux électrodes 8a, 8b, 8c, 8d d'au moins deux paires d'électrodes. Les bornes de connexion sont disposées après le piton du balancier, pour ne pas affecter le balancier-spiral mécaniquement. Une couche résistive du type SiO₂ est déposée au moins localement sur la zone où le spiral est fixé au piton, de manière à éviter tout court-circuit électrique. Un piton isolé peut également être utilisé. Cependant, il peut être imaginé également d'utiliser directement le piton du balancier pour réaliser les connexions électriques.

[0037] Comme indiqué ci-dessus, pour polariser inversement les deux paires d'électrodes, les électrodes 8a et 8d sont reliées à une première borne par exemple représentée par V_{o-} , alors que les électrodes 8b et 8c sont reliées à une seconde borne, par exemple représentée par V_{o+} . Les tensions V_{o+} et V_{o-} sont des tensions alternatives inverses dans le temps avec des signaux rectangulaires ou sinusoïdaux ou des trains d'impulsions pour entretenir l'oscillation du ressort spiral piézoélectrique 3.

[0038] Il est encore à noter qu'il peut être prévu d'appliquer des tensions d'amplitude différente pour chaque paire d'électrodes pour compenser d'éventuelles asymétries. Par exemple une tension V_0 pour la première paire d'électrodes 8a et 8c et une tension V_1 inverse d'amplitude différente de V_0 sur la seconde paire d'électrodes 8b et 8d. Dans ces conditions, il est nécessaire de prévoir à une première extrémité du ressort spiral piézoélectrique 3 quatre bornes de connexion reliées chacune à une électrode respective des deux paires d'électrodes.

[0039] Le ressort spiral piézoélectrique 3, qui est montré à la figure 5, comprend les caractéristiques similaires à celles présentées à la figure 4b. Toutefois dans cette seconde forme d'exécution du ressort spiral piézoélectrique 3, une seule couche piézoélectrique 7 est déposée et maintenue sur les deux premières électrodes 8a, 8b. Une seconde électrode 8c, 8d pour chaque paire d'électrodes est déposée sur la couche piézoélectrique 7 en regard chacune de la première électrode 8a, 8b respective des paires d'électrodes. Toutefois la couche piézoélectrique 7 est déposée aussi bien sur la largeur des deux premières électrodes 8a et 8b et également sur l'espace les séparant. La forme et la dimension de la couche piézoélectrique 7 est équivalente à la forme réunie des deux premières électrodes 8a et 8b et y compris l'espace les séparant.

[0040] L'orientation cristalline de la couche piézoélectrique 7 déposée sur la face de dessus 20 du ressort spiral 3 fournit un bien meilleur résultat que des couches déposées latéralement sur des faces latérales 22 du ressort spiral. Comme montré à la figure 8, l'orientation cristalline de la couche déposée sur les faces latérales 22 a une orientation cristalline inclinée et donc non perpendiculaire comme l'orientation cristalline de la couche piézoélectrique déposée sur la face de dessus 20 du ressort spiral.

[0041] La seconde électrode 8c de la première paire d'électrodes est agencée pour recevoir la tension V_{o+} , alors que la première électrode 8a de la première paire d'électrodes est agencée pour recevoir la tension V_{o-} . La seconde paire d'électrodes est agencée pour être polarisée inversement à la première paire d'électrodes avec la tension V_{o+} fournie à la première électrode 8b de la seconde paire d'électrodes, alors que la seconde électrode 8d de la seconde paire d'électrodes est agencée pour être polarisée par la tension V_{o-} . Cependant, la tension de polarisation fournies aux électrodes 8a, 8b, 8c, 8d depuis les deux bornes de connexion est alternative. Les électrodes 8b et 8c sont donc alternativement polarisées dans le temps par la tension V_{o+} , alors que les électrodes 8a et 8d sont alternativement polarisées dans le temps par la tension V_{o-} , qui est inverse à la tension V_{o+} pour entretenir un mouvement du système oscillant pour l'oscillation du ressort spiral piézoélectrique 3. Bien entendu, les tensions de polarisation des électrodes peuvent varier par des signaux de forme rectangulaire ou des signaux sinusoïdaux.

[0042] Des calculs par éléments finis montrent qu'il est possible, avec cette configuration, d'exciter le ressort spiral 3 d'une manière analogue à celle du dépôt sur les faces latérales 22 du ressort spiral. Même si l'effet piézoélectrique atteint avec cette méthode est inférieur à un dépôt sur les faces latérales 22, ceci peut être compensé par l'utilisation de matériaux présentant de plus grands facteurs piézoélectriques, et qui ne peuvent pas forcément être déposés avec succès sur les faces latérales 22 du ressort spiral 3. Le procédé est notamment compatible avec tous les matériaux piézoélectriques déposables par pulvérisation sous vide (AlN, l'AlScN, PZT, et matériaux piézoélectriques sans-plomb). Deux variantes du procédé de fabrication sont envisagées et décrites par la suite ci-dessous.

[0043] La figure 6 représente une coupe transversale d'une spire du ressort spiral piézoélectrique 3 selon une troisième forme d'exécution. Comme pour la première forme d'exécution, il est prévu au moins deux paires d'électrodes, dont une première électrode 8a de la première paire d'électrodes est disposée en contact de la face de dessus 20 du ressort spiral piézoélectrique 3 et une seconde électrode 8c de la première paire d'électrodes est disposée sur un premier ensemble de couches composites 7, 17, 27 dont au moins une couche piézoélectrique 7, qui peut être une des couches de la première couche à la dernière couche du premier ensemble de couches composites. Une première électrode 8b de la seconde paire d'électrodes est disposée sur la face de dessus 20 de la spire alors que la seconde électrode 8d de la seconde paire d'électrodes est disposée sur un second ensemble de couches composites 7', 17', 27' dont au moins une couche piézoélectrique 7', qui peut être une des couches de la première couche à la dernière couche du second ensemble de couches composites.

[0044] Le premier ensemble de couches composites et le second ensemble de couches composites peuvent avoir les couches disposées en série ou en parallèle entre les deux électrodes 8a et 8c de la première paire d'électrodes ou les deux électrodes 8b et 8d de la seconde paire d'électrodes. Des électrodes intermédiaires peuvent également être prévues entre chaque couche de l'ensemble de couches composites pour relier les couches en série ou en parallèle ou pour court-circuiter une ou plusieurs couches en fonction de la sélection désirée. Il peut s'agir également d'une couche fonctionnelle plutôt que d'une couche piézoélectrique uniquement chaque couche de l'ensemble de couches composites peut être réalisée dans un matériau différent de la couche suivante ou des autres couches prévues.

[0045] Finalement, la quatrième forme d'exécution est représentée à la figure 7 et comparée à la figure 4b. Il est bien prévu deux paires d'électrodes mais orientées différemment pour les première et seconde électrodes 8a et 8c de la première paire d'électrodes et pour les première et seconde électrodes 8b et 8d de la seconde paire d'électrodes. De préférence dans cette quatrième forme d'exécution, il est réalisé sur la face de dessus 20 tout d'abord la première couche piézoélectrique 7 et ensuite ou en même temps la seconde couche piézoélectrique 7'. Par la suite, il est déposé sur deux faces latérales opposées de chaque couche piézoélectrique 7, 7' les première et seconde électrodes 8a, 8c, et 8b, 8d des deux paires d'électrodes.

[0046] Une première couche piézoélectrique 7 est disposée et polarisée par la première et seconde électrodes 8a, 8c de la première paire d'électrodes verticalement par rapport à la face de dessus 20. Et également une seconde couche piézoélectrique 7' est disposée et polarisée par la première et seconde électrodes 8b, 8d de la seconde paire d'électrodes. L'orientation cristalline peut être disposée parallèlement à la face de dessus 20 à la différence de la seconde forme d'exécution ou des formes d'exécution précédente. Cependant, la réalisation de la quatrième forme d'exécution est plus compliquée, que les précédentes formes d'exécution.

[0047] Selon toutes les formes d'exécution présentées ci-dessus, le dépôt de chaque couche piézoélectrique ou électrodes est effectué sur la face de dessus 20, même s'il peut être effectué sur la face de dessous non représentée. De plus, d'autres matériaux piézoélectriques peuvent être utilisés, même s'ils ne mènent pas à un dépôt satisfaisant sur les faces latérales 22 comme pour la présente invention le dépôt se fait sur la face de dessus de la plaquette ou directement sur la face de dessus 20 du ressort spiral piézoélectrique 3. Il n'y a aussi pas de contraintes supplémentaires sur les dimensions du ressort spiral. La hauteur du ressort spiral contribue à la fréquence de résonance du balancier-spiral, de la même manière que sa longueur. D'autre part, un dépôt sur le dessus, notamment la face de dessus 20, est plus facilement contrôlable que sur les faces latérales.

[0048] Il est maintenant décrit deux variantes de réalisation d'un procédé de fabrication d'un ressort spiral piézoélectrique 3 au moyen d'une plaquette de Quartz ou de SOI par un procédé de gravure DRIE ou d'une plaquette en verre par gravure chimique assistée par laser. Toutes les quatre formes de réalisation du ressort spiral piézoélectrique 3 peuvent être obtenues selon les deux variantes de réalisation du procédé de fabrication du ressort spiral piézoélectrique 3.

[0049] Comme expliqué déjà ci-dessus et selon une première variante de réalisation du procédé de fabrication du ressort spiral piézoélectrique 3, il est tout d'abord réalisé la base du ressort spiral 3 par une opération de gravure DRIE depuis le dessus de la plaquette SOI ou à Quartz ou par gravure chimique assistée par laser ou laser pulsé de la plaquette en verre. De manière plus conventionnelle, il peut être réalisé tout d'abord le ressort spiral avant le dépôt des couches piézoélectriques ou électrodes nécessaires pour obtenir le ressort spiral piézoélectrique.

[0050] Dans le cas d'un dépôt par jet ou pulvérisation de matière sous vide notamment des couches piézoélectriques 7, 7' („sputtering“ en terminologie anglaise), tel que l'AlN ou l'AlScN ou le PZT, ainsi que des matériaux piézoélectriques sans plomb comme le KNN (solution solide formée à partir du Niobate de Potassium (KNbO₃, KN) et du Niobate de Sodium (NaNbO₃, NN), les couches piézoélectriques peuvent présenter une texturation déviée d'un angle de plusieurs dizaines de degrés par rapport à la normale sur les faces latérales 22 du ressort spiral 3. L'effet piézoélectrique s'en trouve amoindri, car seule la projection sur la direction du champ électrique y contribue.

[0051] Par contre, l'utilisation du matériau piézoélectrique KNN peut être avantageux s'il est déposé sur la face de dessus 20 du ressort spiral 3, car il peut être déposé sur une épaisseur suffisante par exemple de 5 µm sans grande difficulté.

[0052] Dans une première série d'étapes du procédé de fabrication de la seconde variante, il est possible de réaliser tout d'abord des électrodes ou des couches piézoélectriques prenant la forme et longueur programmées sur une face de dessus de la plaquette SOI ou à Quartz pour obtenir par la suite le ressort spiral piézoélectrique. Une fois que l'ensemble des électrodes liées aux couches piézoélectriques est obtenu sur la face de dessus 20 de la plaquette SOI ou à Quartz ou en verre, il peut être effectué une gravure ou structuration du ressort spiral notamment jusqu'à une certaine profondeur de gravure du ressort spiral. Dans les étapes finales de réalisation, la base de la plaquette SOI est retirée aussi par une gravure du type DRIE (gravure ionique réactive profonde). Dès cet instant le ressort spiral piézoélectrique est obtenu avec déjà l'agencement des électrodes et des couches piézoélectriques sur la face de dessus 20 du ressort spiral.

[0053] Pour le cas de l'utilisation du ressort spiral piézoélectrique 3 pour prélever de l'énergie ou pour alimenter un circuit moteur, il peut être nécessaire d'avoir un ressort spiral plus gros et plus long.

[0054] Il est encore à noter qu'avec plus de surface piézoélectrique, cela implique plus d'amplitude du mouvement, à tensions équivalentes. C'est en général favorable pour un moteur. Cependant, il est possible de travailler à plus haute fréquence de quelques centaines de Hz et plus petite amplitude, avec les rapports d'engrenages adéquats. Dans ce cas, on peut utiliser un ressort spiral d'encombrement similaire. D'autre part, on peut utiliser moins de pièces dans la montre par exemple plus haut niveau du barillet ou plus petit barillet. Le diamètre extérieur typique d'un spiral moteur avec large spire serait de l'ordre de 7 mm contre environ 5 mm pour un spiral chronométrique classique. Il est bien clair que ça reste en dessous du diamètre du balancier.

[0055] Il est facile d'augmenter l'épaisseur des couches piézoélectriques ou d'augmenter la longueur du ressort en tant que tel pour adapter par exemple la fréquence d'oscillation. Par contre, il n'est pas touché aux arêtes des bords de la spire susceptibles de causer des problèmes de fissures. Il y a beaucoup plus de facilité à réaliser l'agencement des couches

piézoélectriques sur une des faces de dessus ou de dessous. Il faut augmenter la longueur du ressort spiral si on augmente son épaisseur, pour conserver la même fréquence de résonance ou d'oscillation. Une autre conséquence c'est qu'on peut, de cette manière, ajouter des couches sur un ressort spiral avec une modification minime voire nulle de sa géométrie. L'effet d'un dépôt sur les faces latérales est beaucoup plus important et nécessite plus d'ajustement de la géométrie du ressort spiral.

[0056] On peut encore préciser qu'il y a une facilité d'utiliser des matériaux piézoélectriques difficilement structurables sur les faces latérales ou pouvant nécessiter une co-déposition de plusieurs matériaux différents par exemple le AlScN lorsqu'on ne dispose pas d'une cible pré-mélangée.

[0057] Un autre avantage est qu'on bénéficie d'une meilleure orientation cristalline perpendiculaire sur la face de dessus alors que sur les faces latérales elle est inclinée. L'homogénéité du dépôt sur l'ensemble du wafer et sur chaque spire est bien plus grande.

[0058] A titre comparatif, l'épaisseur de dépôt sur les faces latérales du ressort spiral dépend aussi de l'espacement entre les spires du ressort ce qui concerne l'effet d'ombrage décrit ci-dessus. Plus les spires sont proches, plus l'épaisseur déposée sur les faces latérales est petite et plus le gradient d'épaisseur sur la face latérale sera grand. Dans le cas du dépôt sur le dessus l'épaisseur de la couche piézoélectrique sera quasi identique sur chaque spire. C'est un avantage pour le contrôle de la justesse de fabrication, et on limite la différence entre les designs réalisés et la réalité.

[0059] Le nombre de paires d'électrodes utilisées n'est pas limité à deux. Par exemple trois ou quatre paires d'électrodes pourraient être utilisées. Avec plusieurs paires d'électrodes on peut appliquer différentes séquences de tension sur les couches par exemple excitation électrique des paires centrales pour la correction de la dérive sur l'amplitude de la montre et récupération d'énergie ou captage sur les deux paires extérieures.

[0060] On peut aussi utiliser un nombre impair de paires d'électrodes par exemple trois paires avec la paire centrale à utiliser seulement comme capteur, et les couches extérieures pour l'action sur le spiral. De cette manière, des circuits de correction différents peuvent être utilisés, avec rétroactions directes en fonction des informations recueillies sur la couche centrale.

[0061] Pour la première variante ou la seconde variante du procédé, la dernière étape du procédé peut consister à retirer la plaque de silicium de base faisant partie de l'isolant. Suite à cela, le ressort spiral en silicium peut être relié à un circuit d'autorégulation de fréquence d'oscillation ou à un circuit de récupération d'énergie ou à un circuit moteur pour l'actionnement du mouvement ou son entretien automatique. De plus, il peut être relié à une plaque à circuit imprimé pour la connexion aux autres composants du système. Les deux bornes de connexion à une extrémité du ressort spiral piézoélectrique sont reliées à au moins deux paires d'électrodes 8a, 8b, 8c, 8d disposées sur la face de dessus 20 du ressort spiral piézoélectrique 3. Les électrodes 8a et 8d sont reliées à une première borne de connexion, alors que les électrodes 8b et 8c sont reliées à une seconde borne de connexion.

[0062] Comme déjà préalablement mentionné, grâce à la réalisation des électrodes et des couches piézoélectriques sur la face de dessus, il est facile d'augmenter l'épaisseur, voire la longueur des couches piézoélectriques sur le ressort spiral. Il peut être facilement réalisé jusqu'à une épaisseur de 3 μm sur le dessus alors que sur les côtés uniquement 1 μm est contrôlable. Ces valeurs correspondent à l'AlN comme couche piézoélectrique. Certains autres matériaux, comme le KNN, peuvent être déposés jusqu'à 5 μm . On peut rencontrer quelques difficultés concernant la structuration, mais par contre pas concernant l'utilisation de tels matériaux présentant de plus grands facteurs piézoélectriques.

[0063] Il est à noter qu'il peut être prévu que les électrodes des deux paires d'électrodes et la couche piézoélectrique s'étendent uniquement sur une première spire du ressort spiral depuis une première extrémité du ressort spiral où se situent les bornes de connexion. Ceci est avantageux pour un circuit d'autorégulation à faible consommation.

[0064] De plus, la dimension et principalement la largeur des électrodes et des couches piézoélectriques déposées successivement sur la face de dessus du ressort spiral peuvent légèrement varier de quelques μm suite au procédé de fabrication. Ainsi chaque première électrode déposée directement sur la face de dessus peut être légèrement plus large que la seconde électrode déposée sur la couche

[0065] A partir de la description qui vient d'être faite, plusieurs autres formes d'exécution du ressort spiral piézoélectrique peuvent être réalisées sans sortir du cadre de l'invention définie par les revendications. Il est possible d'utiliser deux couches piézoélectriques d'un matériau différent l'une de l'autre sur la face de dessus du ressort spiral piézoélectrique.

Revendications

1. Ressort spiral piézoélectrique (3) pour un circuit d'autorégulation (10) d'une fréquence d'oscillation d'un système mécanique oscillant (2, 3) ou un circuit de récupération d'énergie ou un circuit moteur pour l'actionnement du mouvement ou son entretien automatique, caractérisé en ce que le ressort spiral piézoélectrique (3) comprend au moins une couche piézoélectrique (7, 7', 17, 17', 27, 27') déposée sur une face de dessus (20) ou de dessous d'un certain nombre de spires du ressort en plan, et au moins deux paires d'électrodes (8a, 8b, 8c, 8d) où les électrodes de chaque paire sont disposées du côté de deux

faces opposées d'au moins une couche piézoélectrique (7) ou respectivement de deux couches piézoélectriques distinctes (7, 7') de manière à appliquer une tension de polarisation inverse sur chaque paire d'électrodes.

2. Ressort spiral piézoélectrique (3) selon la revendication 1, caractérisé en ce que la première électrode (8a) de la première paire d'électrodes est reliée à la seconde électrode (8d) de la seconde paire d'électrodes, et en ce que la seconde électrode (8c) de la première paire d'électrodes est reliée à la première électrode (8b) de la seconde paire d'électrodes.
3. Ressort spiral piézoélectrique (3) selon l'une des revendications 1 et 2, caractérisé en ce que la première électrode (8a) de la première paire d'électrodes et la seconde électrode (8d) de la seconde paire d'électrodes sont reliées à une première borne de connexion à une première extrémité du ressort spiral piézoélectrique (3), et en ce que la première électrode (8b) de la seconde paire d'électrodes et la seconde électrode (8c) de la première paire d'électrodes sont reliées à une seconde borne de connexion à la première extrémité du ressort spiral piézoélectrique (3).
4. Ressort spiral piézoélectrique (3) selon la revendication 1, caractérisé en ce que toutes les électrodes (8a, 8b, 8c, 8d) des deux paires d'électrodes sont reliées chacune à une borne de connexion respective à une première extrémité du ressort spiral piézoélectrique (3).
5. Ressort spiral piézoélectrique (3) selon la revendication 1, caractérisé en ce que la première électrode (8a) de la première paire d'électrodes est déposée directement sur la face de dessus (20) du ressort spiral piézoélectrique (3), en ce que la première électrode (8b) de la seconde paire d'électrodes est déposée directement sur la face de dessus (20) du ressort spiral piézoélectrique (3), et en ce que les premières électrodes (8a; 8b) des deux paires d'électrodes sont régulièrement espacées l'une de l'autre et suivent chacune la forme de spires depuis une première extrémité du ressort spiral (3) et en direction de la seconde extrémité du ressort spiral (3).
6. Ressort spiral piézoélectrique (3) selon la revendication 5, caractérisé en ce que les premières électrodes (8a; 8b) et les secondes électrodes (8c; 8d) des deux paires d'électrodes s'étendent de la première extrémité du ressort spiral (3) à plus de la moitié de la longueur totale du ressort spiral piézoélectrique (3).
7. Ressort spiral piézoélectrique (3) selon la revendication 5, caractérisé en ce qu'une première couche piézoélectrique (7) est déposée sur la première électrode (8a) de la première paire d'électrodes, en ce qu'une seconde couche piézoélectrique (7') est déposée sur la première électrode (8b) de la seconde paire d'électrodes, et en ce que la forme et la dimension de la première couche piézoélectrique (7) est identique à la forme et la dimension de la première électrode (8a) de la première paire d'électrodes, et en ce que la seconde couche piézoélectrique (7') est identique à la forme et la dimension de la première électrode (8b) de la seconde paire d'électrodes.
8. Ressort spiral piézoélectrique (3) selon la revendication 1, caractérisé en ce que les premières électrodes (8a; 8b) et les secondes électrodes (8c; 8d) des deux paires d'électrodes et la couche piézoélectrique (7) s'étendent depuis une première extrémité du ressort spiral (3) sur une première spire du ressort spiral (3).
9. Ressort spiral piézoélectrique (3) selon la revendication 1, caractérisé en ce que la première électrode (8a) de la première paire d'électrodes est déposée directement sur la face de dessus (20) du ressort spiral piézoélectrique (3), en ce que la première électrode (8b) de la seconde paire d'électrodes est déposée directement sur la face de dessus (20) du ressort spiral piézoélectrique (3), et en ce qu'une couche piézoélectrique (7) est déposée sur les premières électrodes (8a; 8b) aussi bien sur la largeur des deux premières électrodes (8a; 8b) et également sur l'espace les séparant.
10. Ressort spiral piézoélectrique (3) selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'une première électrode (8a) de la première paire d'électrodes est disposée en contact de la face de dessus (20) du ressort spiral piézoélectrique (3) et une seconde électrode (8c) de la première paire d'électrodes est disposée sur un premier ensemble de couches composites (7, 17, 27) monté sur la première électrode (8a) de la première paire d'électrodes, dont au moins une couche est une couche piézoélectrique (7), et en ce qu'une première électrode (8b) de la seconde paire d'électrodes est disposée sur la face de dessus (20) du ressort spiral piézoélectrique (3) alors que la seconde électrode (8d) de la seconde paire d'électrodes est disposée sur un second ensemble de couches composites (7', 17', 27') monté sur la première électrode (8b) de la seconde paire d'électrodes, dont au moins une couche est une couche piézoélectrique (7').
11. Ressort spiral piézoélectrique (3) selon la revendication 10, caractérisé en ce que des électrodes intermédiaires sont prévues entre chaque couche de chaque ensemble de couches composites (7, 7', 17, 17', 27, 27') pour relier les couches en série ou en parallèle ou pour court-circuiter une ou plusieurs couches en fonction de la sélection désirée.
12. Ressort spiral piézoélectrique (3) selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'une première couche piézoélectrique (7) est déposée sur une face de dessus (20) du ressort spiral piézoélectrique (3), en ce qu'une seconde couche piézoélectrique (7') est déposée sur la face de dessus (20) du ressort spiral piézoélectrique (3) espacée de la première couche piézoélectrique (7), en ce qu'une première électrode (8a) de la première paire d'électrodes est disposée sur une face latérale de la première couche piézoélectrique (7), alors qu'une seconde électrode (8c) de la première paire d'électrodes est disposée sur une face latérale opposée de la première couche piézoélectrique (7), en ce qu'une première électrode (8b) de la seconde paire d'électrodes est disposée sur une face latérale de la seconde couche

piézoélectrique (7'), alors qu'une seconde électrode (8d) de la seconde paire électrode est disposée sur une face latérale opposée de la seconde couche piézoélectrique (7').

13. Ressort spiral piézoélectrique (3) selon la revendication 1, caractérisé en ce que chaque couche piézoélectrique (7, 7') disposée sur la face de dessus (20) du ressort spiral piézoélectrique (3) est une couche dénommée AlN ou AlScN ou PZT ou KNN.
14. Procédé de fabrication d'un ressort spiral piézoélectrique (3) selon l'une des revendications précédentes, sur la base d'une plaquette SOI (30) ou d'une plaquette en Quartz ou d'une plaquette en verre, caractérisé en ce qu'il est tout d'abord réalisé la base du ressort spiral (3) par une opération de gravure DRIE depuis le dessus de la plaquette SOI ou à Quartz, ou par une gravure chimique assistée par laser depuis le dessus de la plaquette en verre, et en ce qu'une fois que la forme du ressort spiral (3) est réalisé en ayant laissé encore la base (30) de la plaquette ou en ayant retiré complètement la base (30) de la plaquette par gravure DRIE ou par gravure chimique assistée par laser, il est effectué les dépôts d'une ou plusieurs couches piézoélectriques (7, 7') sur la face de dessus (20) du ressort spiral (3) et les dépôts des premières et secondes électrodes (8a, 8b, 8c, 8d) des deux paires d'électrodes combinées avec la ou les couches piézoélectriques (7, 7') selon la forme et la dimension programmées.
15. Procédé de fabrication d'un ressort spiral piézoélectrique (3) selon l'une des revendications 1 à 13, sur la base d'une plaquette SOI (30) ou d'une plaquette en Quartz ou d'une plaquette en verre, caractérisé en ce qu'il est effectué directement sur la face de dessus brute de la plaquette SOI (30) ou en Quartz ou en verre, les dépôts d'une ou plusieurs couches piézoélectriques (7, 7') prenant la forme et longueur programmées de spires et les dépôts des premières et secondes électrodes (8a, 8b, 8c, 8d) des deux paires d'électrodes prenant la forme et longueur programmées de spires combinées avec la ou les couches piézoélectriques (7, 7'), et en ce qu'une fois que les électrodes (8a, 8b, 8c, 8d) de chaque paire d'électrodes sont disposées sur deux faces opposées d'une ou deux couches piézoélectriques (7, 7') ou d'un ou deux ensembles de couches composites (7, 7', 17, 17', 27, 27') sur la face brute de dessus (20), une opération de gravure DRIE depuis le dessus de la plaquette SOI ou à Quartz du ressort spiral (3), ou une gravure chimique assistée par laser depuis le dessus de la plaquette en verre, est effectuée selon la forme et la longueur totale programmée, et en ce qu'une dernière opération de gravure DRIE ou de gravure chimique assistée par laser est effectuée pour retirer complètement la base (30) de la plaquette pour obtenir le ressort spiral piézoélectrique (3) final.

Fig. 1
(Art antérieur)

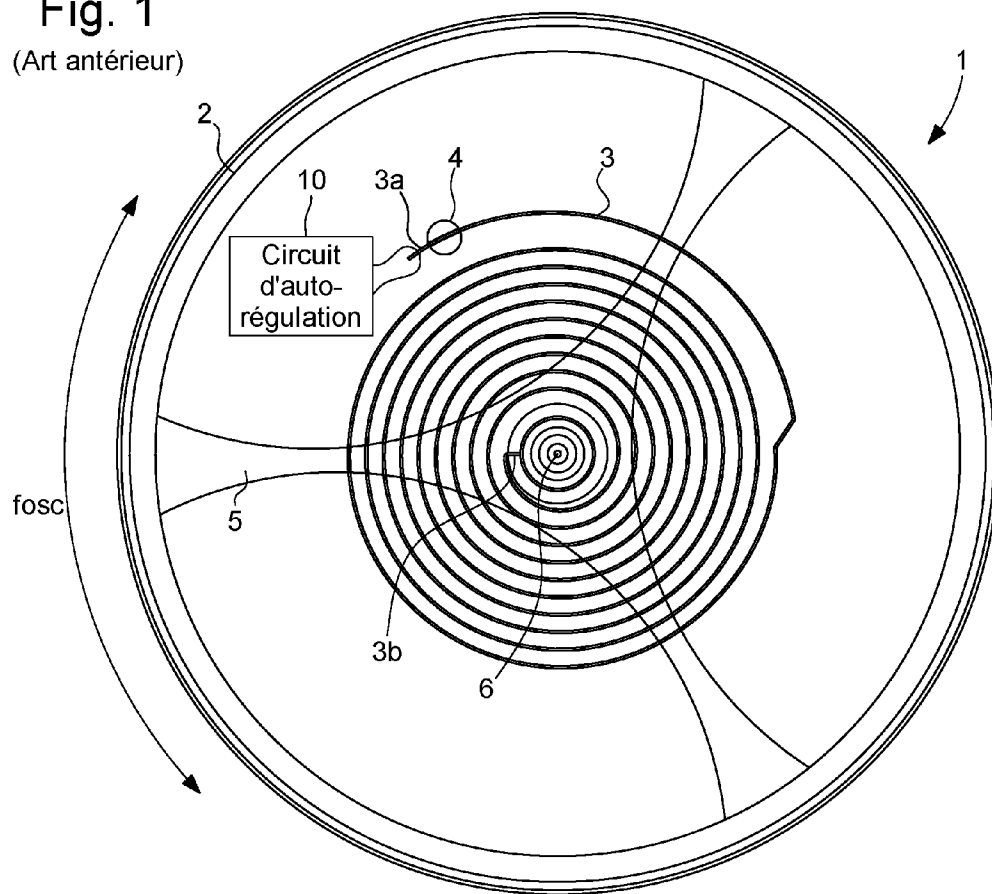


Fig. 2
(Art antérieur)

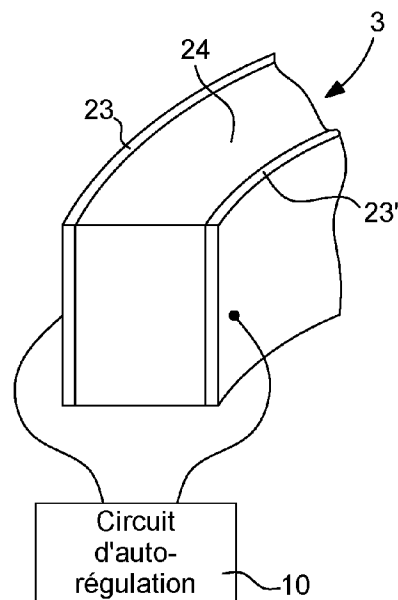


Fig. 3
(Art antérieur)

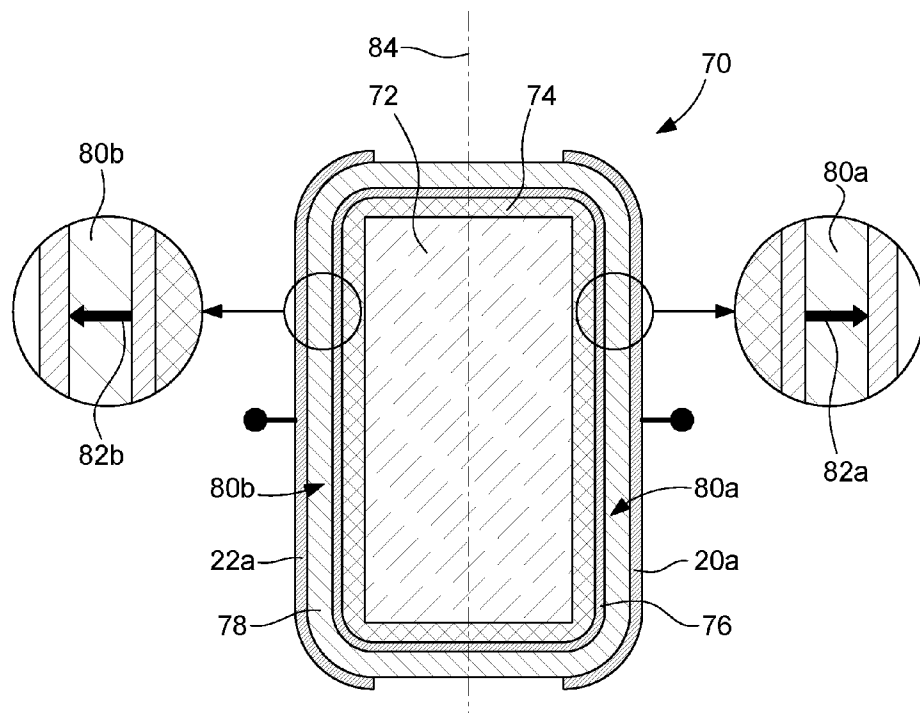


Fig. 4a

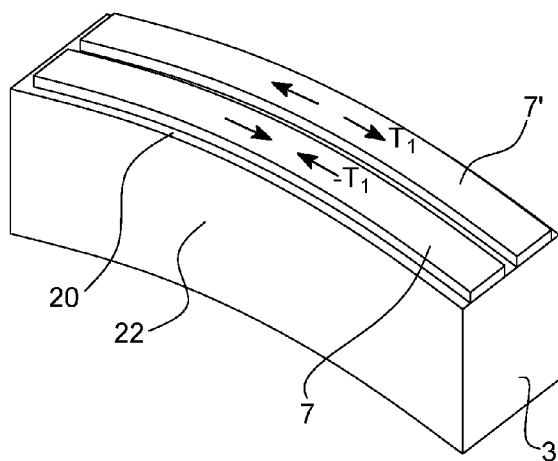


Fig. 4b

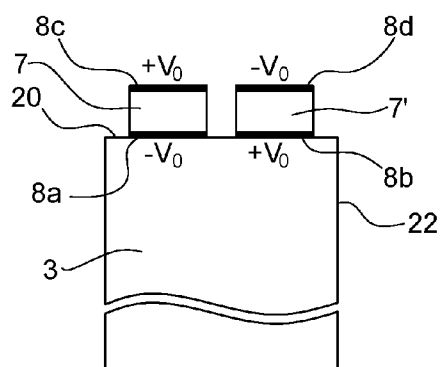


Fig. 5

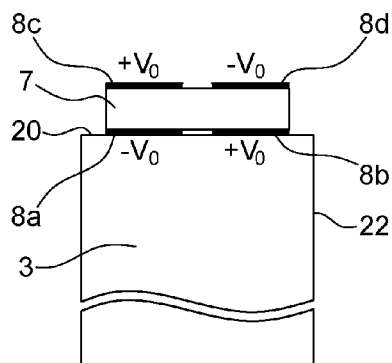


Fig. 6

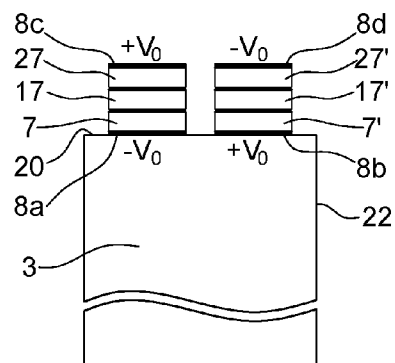


Fig. 7

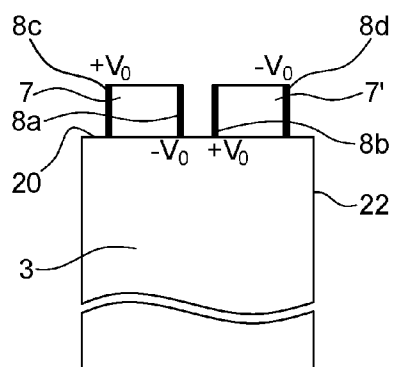


Fig. 8

