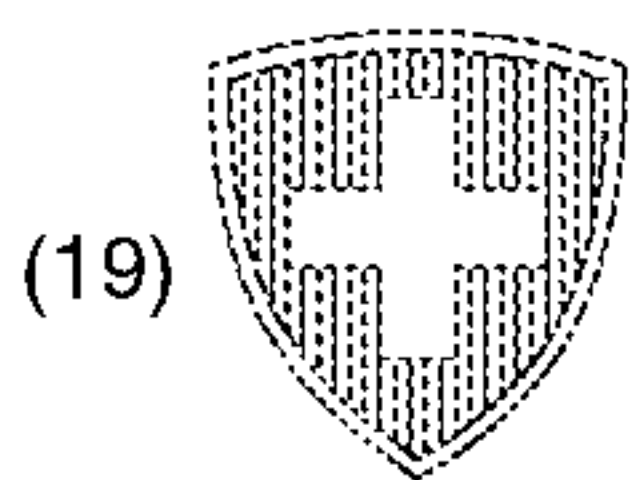




CONFÉDÉRATION SUISSE
INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) **CH** **716 696 A2**

(51) Int. Cl.: **G04B** 17/06 (2006.01)
F16F 1/10 (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: 01314/19

(22) Date de dépôt: 15.10.2019

(43) Demande publiée: 15.04.2021

(71) Requéant:
Sigatec SA, Route des Iles 20
1950 Sion (CH)

(72) Inventeur(s):
Marc-André Glassey, 1967 Bramois (CH)
Nicolas Tille, 1965 Savièse (CH)

(74) Mandataire:
BOVARD SA Conseils en propriété intellectuelle,
Optingenstrasse 16
3013 Bern (CH)

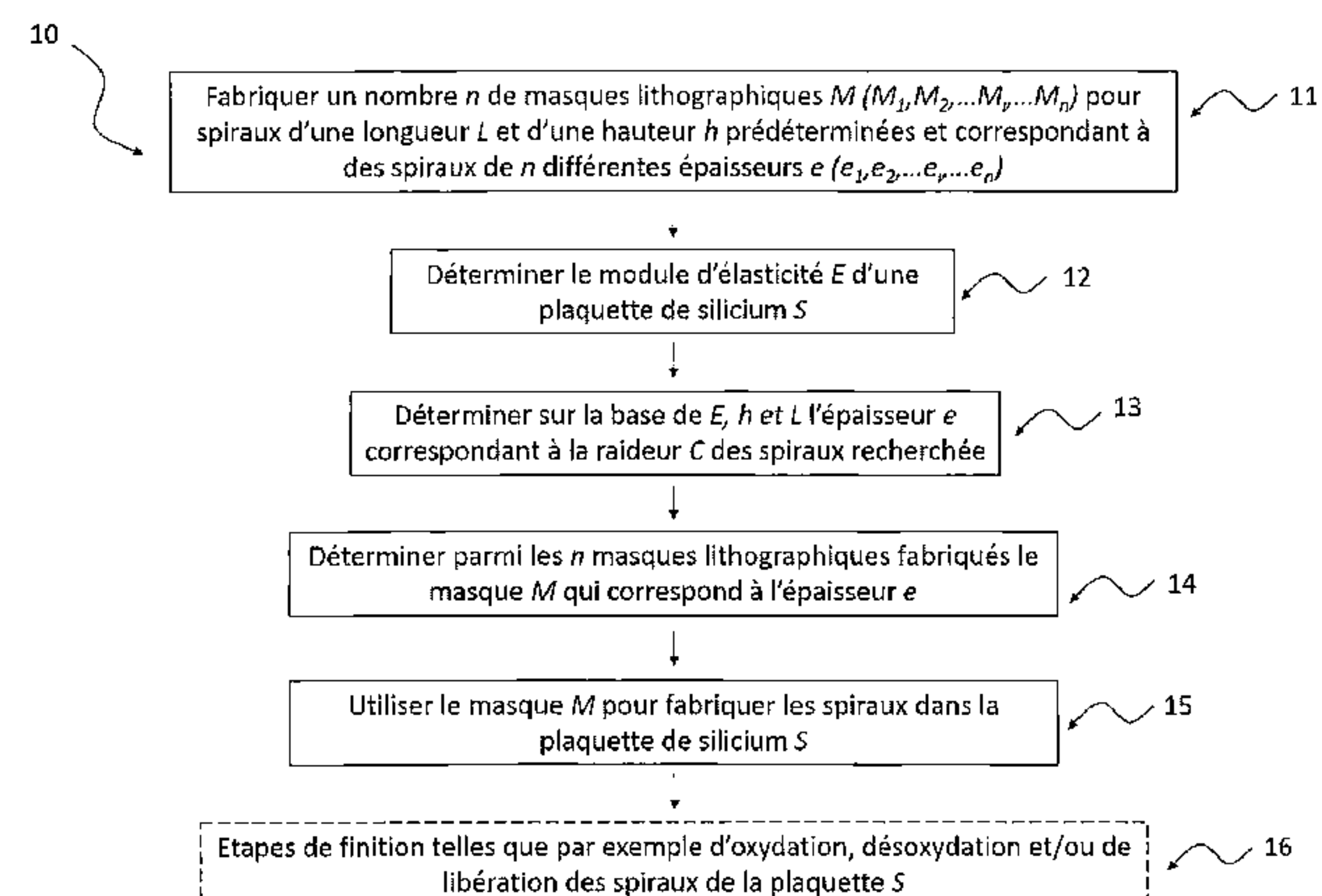
(54) **Procédé de fabrication de spiraux horlogers.**

(57) La présente invention se rapporte à un procédé de fabrication de spiraux horlogers d'une longueur L , d'une hauteur h prédéterminées et d'une raideur C recherchée, comprenant les étapes :

a. Déterminer (12) le module d'élasticité E de la pièce de matière à partir de laquelle les spiraux horlogers sont fabriqués ;

b. Déterminer (12) sur la base du module d'élasticité E , de la hauteur h et de la longueur L , l'épaisseur e des spiraux horlogers correspondant à la raideur C recherchée ;

c. Fabriquer (15, 16) les spiraux horlogers de dimensions h , L , et e .



Description

Domaine technique de l'invention

[0001] La présente invention se rapporte au domaine de l'horlogerie. Plus précisément, elle concerne un procédé de fabrication de spiraux horlogers. En particulier, la présente invention se rapporte à un procédé de fabrication de spiraux horlogers pouvant être des spiraux horlogers en silicium. Encore plus particulièrement, la présente invention se rapporte à un procédé de fabrication de spiraux horlogers en silicium avec thermo-compensation.

État de la technique

[0002] Dans un mouvement d'horlogerie, l'organe oscillant, aussi appelé oscillateur, a pour fonction de fournir une fréquence de référence, sur la base de laquelle la mesure de l'écoulement du temps peut être effectuée. Un oscillateur mécanique classiquement utilisé en horlogerie résulte de l'association d'un spiral horloger et d'un balancier. Ce dernier est monté pivotant et joue le rôle d'un volant d'inertie, tandis que le spiral horloger est un ressort prévu pour produire un couple de rappel sur ce balancier.

[0003] Depuis quelques années, de nouveaux matériaux, tel que par exemple le silicium, sont utilisés pour la fabrication de spiraux horlogers. Dans le document EP1422436B1, il est par exemple proposé de fabriquer un spiral horloger qui comporte une âme en silicium et qui possède une compensation thermique grâce à un revêtement fait de dioxyde de silicium. Cette compensation thermique permet de réduire les effets des changements de température sur la fréquence d'oscillation de l'oscillateur.

[0004] L'utilisation de nouveaux matériaux pour la fabrication de spiraux horlogers a également permis d'adopter de nouvelles techniques de fabrication telles que la gravure ionique réactive profonde (encore appelée gravure DRIE, qui est l'acronyme en anglais de Deep Reactive Ionique Etching). Ces nouvelles techniques, en particulier la gravure DRIE, ont notamment l'avantage de permettre de fabriquer plusieurs spiraux horlogers dans une même plaquette, par exemple une plaquette (ou „wafer“) de silicium, et ainsi de réduire les coûts de fabrication.

[0005] Les procédés de fabrication de composants horlogers d'une seule élévation connus comme par exemple des roues d'ancre et des ancres ne sont pas suffisamment précis pour la fabrication des spiraux. Les procédés de fabrication de composants d'une seule élévation connus peuvent contenir la succession des étapes suivantes :

- a) Fabrication d'un masque lithographique ;
- b) Lithographie sur la face supérieure d'un wafer à base de silicium, par exemple un wafer SOI afin de créer un masque de gravure DRIE ;
- c) Gravure DRIE d'une face du wafer SOI ;
- d) Enlèvement des restes du masque de gravure, par exemple à l'aide d'un plasma ;
- e) Lissage par oxydation et désoxydation du wafer SOI, par exemple comme décrit par W. H. Juan et S. W. Pang dans l'article „Controlling sidewall smoothness for micromachined Si mirrors and lenses“ (1996) ; ou par Sunil Kumar dans sa thèse „Design and Fabrication of Micromachined Silicon Suspensionns“, University of London, (2007)
- f) Libération de la partie gravée du wafer SOI contenant les composants reliés à cette partie gravée par une attache, par exemple comme décrit au paragraphe 7.2.2 du livre „Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies“ (2010); et
- g) Une oxydation permettant un renforcement des composants peut être réalisée à la fin du procédé, comme dans le brevet EP1904901. Facultativement, pour les ressorts spiraux, l'oxydation permet la thermo-compensation.

[0006] Avec les procédés de fabrication de spiraux horlogers connus de l'art antérieur, en particulier avec les procédés de fabrication de spiraux horlogers en silicium, une dispersion, qui peut parfois être large, de la valeur moyenne de la raideur C des spiraux est constatée entre des spiraux émanant de différentes plaquettes. Cette dispersion est constatée même si tous les spiraux horlogers sont fabriqués en utilisant la même méthode, par exemple par gravure, et selon le même motif, c'est-à-dire selon les mêmes dimensions géométriques, dans des plaquettes apparemment identiques.

[0007] Afin de circonvenir à ce problème, le document WO2015/113973 propose un procédé de fabrication d'un spiral horloger ayant une raideur prédéterminée. Dans ce procédé, une ébauche de spiral horloger, découpée selon des dimensions supérieures aux dimensions finales visées, est ajustée après découpe par un retrait de matière sur une épaisseur calculée à partir d'une mesure de la raideur sur l'ébauche du spiral horloger. La solution proposée dans ce document, nécessite, pour obtenir des résultats suffisamment précis, d'appliquer une correction individuelle à chaque spiral fabriqué. Ce procédé qui est coûteux et compliqué à mettre en oeuvre ne permet donc pas de fabriquer un grand nombre de spiraux ayant tous une raideur C dans une plage de valeurs prédéterminée, sans correction.

[0008] Il existe par conséquent un besoin pour un procédé de fabrication de spiraux horlogers, en particuliers des spiraux en silicium, qui permet d'obtenir, sans correction, tous les spiraux d'un lot de fabrication ayant une raideur C dans une plage de valeurs déterminée suffisamment restreinte pour que les spiraux puissent être appariés à des balanciers, formant ainsi des oscillateurs pouvant être utilisés dans une montre.

Résumé de l'invention

[0009] Un but de la présente invention est donc de proposer un procédé de fabrication de spiraux horlogers permettant de surmonter les limitations mentionnées préalablement.

[0010] Selon l'invention, ces buts sont atteints grâce à l'objet de la revendication indépendante. Les aspects plus spécifiques de la présente invention sont décrits dans les revendications dépendantes ainsi que dans la description.

[0011] De manière plus spécifique, un but de l'invention est atteint grâce à un procédé de fabrication de spiraux horlogers d'une longueur L, d'une hauteur h prédéterminées et d'une raideur C recherchée, comprenant les étapes :

- a. Déterminer le module d'élasticité E de la pièce de matière à partir de laquelle les spiraux horlogers sont fabriqués ;
- b. Déterminer sur la base du module d'élasticité E, de la hauteur h et de la longueur L, l'épaisseur e des spiraux horlogers correspondant à la raideur C recherchée ;
- c. Fabriquer les spiraux horlogers de dimensions h, L, et e.

[0012] Grâce à un tel procédé, il est possible de supprimer, ou de fortement diminuer, la dispersion de la raideur C entre les différents spiraux produits à partir de différentes pièces de matière qui, de prime abord, semblent être identiques.

[0013] Il est connu que la raideur C d'un ressort spiral est liée au module d'élasticité E de la pièce de matière à partir de laquelle le spiral est fabriqué selon la formule :

$$C = \frac{E \times h \times e^3}{12 \times L} (1)$$

[0014] Afin de déterminer la raideur C d'un spiral la formule ci-dessus peut être utilisée facilement dans les cas où les valeurs de h, et e sont constantes le long de la longueur L. Dans le cas où les valeurs de h et e varient le long de la longueur L la raideur peut se déterminer par des méthodes numériques.

[0015] La dispersion de E, c'est-à-dire les différences dans ses valeurs effectives, provoque une dispersion proportionnelle de la raideur C des spiraux, par pièce de matière bien que les spiraux aient tous, à priori, les mêmes dimensions géométriques.

[0016] En mesurant le module d'élasticité E de la pièce de matière à partir de laquelle les spiraux horlogers sont fabriqués avant de fabriquer les spiraux, il est possible d'adapter l'épaisseur e des spiraux à fabriquer afin que ces spiraux possèdent la raideur C recherchée. En d'autres termes, en adaptant l'épaisseur e en fonction du module d'élasticité E mesuré, il est possible de supprimer, ou tout au moins de fortement réduire, la dispersion de la raideur C des spiraux fabriqués. Le procédé inventif consiste donc à compenser les différences de module d'élasticité E par des variations d'épaisseurs e.

[0017] En particulier le procédé inventif permet d'obtenir, sans correction, les spiraux d'une fabrication dans une plage de raideur déterminée suffisamment restreinte pour être appariés à des balanciers. Il permet, de plus, de manière tout à fait classique, le classement des balanciers et des spiraux sur une machine de type „Omega-Metric“ et l'appariage de ces derniers pour obtenir une fréquence proche de la fréquence de référence désirée. L'ajustement final de la fréquence pourra se faire en variant l'inertie des balanciers à l'aide de masselottes ou de vis. L'utilisation d'une raquetterie peut également permettre cet ajustement.

[0018] Dans un premier mode de réalisation préféré de la présente invention, la pièce de matière est sous forme d'une plaquette S, en particulier une plaquette S à base de silicium, avantageusement une plaquette de type SOI (pour „Silicon On Insulator“, qui est une plaquette comprenant une couche d'oxyde de silicium entre deux couches de silicium). Il est ainsi possible, grâce au procédé de la présente invention, de fabriquer des spiraux en silicium ayant tous une raideur C recherchée dans une plage de valeurs prédéterminée.

[0019] Dans un autre mode de réalisation préféré de la présente invention, les spiraux horlogers sont fabriqués à l'étape c. en utilisant un masque lithographique M. Grâce à un masque lithographique, il est possible de fabriquer des spiraux horlogers d'une grande précision géométrique ce qui permet de réduire d'avantage la dispersion de la raideur C des spiraux fabriqués. De plus, la lithographie est un procédé simple et peu coûteux qui, si nécessaire, peut être implémenté dans des salles blanches.

[0020] Dans un mode de réalisation préféré de la présente invention, n masques lithographiques M ($M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_n$) et correspondant à n épaisseurs e ($e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_n$) sont fabriqués avant une des étapes a. ou b.. Grâce à ceci, les masques lithographiques nécessaires à la fabrication des spiraux horlogers de raideur C recherchée sont à disposition

lorsqu'ils doivent être utilisés. De manière générale, le masque M, correspondra à une épaisseur e_i et le masque M_{i+1} correspondra à une épaisseur $e_{i+1} = e_i + \Delta$, Δ étant un incrément, et ainsi de suite jusqu'au masque M_n , créant ainsi tout un ensemble de masques M correspondant à toute une plage de raideurs C possibles. De manière avantageuse l'incrément Δ a une valeur entre 0.1 μm et 0.5 μm , de préférence entre 0.2 μm et 0.4 μm , de manière encore plus avantageuse 0.3 μm .

[0021] Dans un autre mode de réalisation préféré de la présente invention, l'étape c. est effectuée en utilisant le masque lithographique M, correspondant à l'épaisseur e déterminée à l'étape b.. Grâce à ceci on peut, à l'aide du masque lithographique M, fabriquer des spiraux horlogers possédant la raideur C recherchée. Afin de déterminer quel masque M doit être utilisé, il peut être favorable de réaliser un tableau de correspondance déterminant le masque à utiliser selon la mesure du module d'élasticité E permettant ainsi de viser la raideur C recherchée.

[0022] Dans encore un autre mode de réalisation préféré de la présente invention, le masque lithographique M correspondant à l'épaisseur e est fabriqué après l'étape b.. Grâce à ce mode de réalisation, il est possible d'éviter de constituer, à priori, une série de masques lithographiques correspondant à toute une plage d'épaisseurs. Le masque lithographique M nécessaire pour la fabrication des spiraux possédant la raideur C recherchée est, dans ce mode de réalisation, fabriqué après la mesure du module d'élasticité E de la pièce de matière à partir de laquelle les spiraux sont fabriqués. Il est ainsi possible de faire correspondre plus précisément l'épaisseur e du masque M avec la raideur C recherchée.

[0023] Dans un mode de réalisation préféré de la présente invention, le procédé comprend une ou plusieurs étapes de finition, par exemple une ou plusieurs étapes d'oxydation et de désoxydation de lissage suivi par une étape de libération de la partie gravée du wafer SOI contenant les composants reliés à cette partie gravée par une attache. Après libération des spiraux ceux-ci peuvent avantageusement être soumis à une oxydation de thermo-compensation. Cela permet par exemple de fabriquer des spiraux thermocompensés.

[0024] Dans un mode de réalisation préféré les composants libérés sont liés les uns aux autres par une attache à une épargne et les spiraux sont détachés de leur épargne après une étape d'oxydation de thermo-compensation. Cela permet de pouvoir effectuer l'étape de d'oxydation de thermo-compensation sur des spiraux qui sont encore liés par une attache en une seule étape.

[0025] Dans un autre mode de réalisation préféré de la présente invention, l'épaisseur e déterminée à l'étape b. prend en compte la valeur du module d'élasticité E des spiraux après une ou plusieurs étapes de finition. En effet, les étapes de finition et, en particulier, des étapes d'oxydation et/ou de désoxydation peuvent avoir une influence sur la raideur finale des spiraux. En prenant en compte l'effet des étapes de finition sur la raideur des spiraux, il est possible de fabriquer les spiraux avec une raideur C transitoire légèrement différente de celle recherchée au finale sachant que cette raideur C transitoire va être modifiée pendant la ou les étapes de finition. En choisissant de manière adéquate la valeur de la raideur C transitoire et en sachant l'effet des étapes de finition sur la raideur des spiraux fabriqués, il est donc possible d'atteindre précisément la raideur finale recherchée.

[0026] Dans un autre mode de réalisation préféré de la présente invention, le module d'élasticité E est déterminé à l'étape a., par exemple, par nanoindentation, par mesure de la résistivité électrique, par mesure d'un prélèvement d'une structure flexible oscillante qui serait prélevée sur le wafer avant la fabrication des spiraux. Cette structure peut typiquement être sciée sur un bord du wafer. De ce prélèvement on extraira la partie d'épaisseur correspondant au spiraux dont on déterminera le module d'élasticité avec des moyens de mesure classiques, par exemple, par traction ou flexion. Une combinaison de ces méthodes peut également être réalisée. Il est ainsi possible de mesurer rapidement et/ou avec grande précision le module d'élasticité E de la pièce de matière à partir de laquelle les spiraux sont fabriqués. Plus la mesure du module d'élasticité E est précise, plus il est possible de limiter la dispersion de la raideur C des spiraux.

[0027] Dans un mode de réalisation préféré de la présente invention, l'épaisseur e est déterminée à l'étape b. grâce à la formule :

$$e = \sqrt[3]{\frac{C \times 12 \times L}{E \times h}}$$

[0028] A l'aide de cette formule, il est particulièrement aisé de déterminer en fonction du module d'élasticité E, de la hauteur h et de la longueur L, l'épaisseur e que doit avoir les spiraux pour atteindre la raideur C recherchée.

[0029] Dans un autre mode de réalisation préféré de la présente invention, les spiraux horlogers sont fabriqués à l'étape c., par gravure, plus particulièrement par gravure ionique réactive profonde. Grâce à ces méthodes de fabrication, il est possible de fabriquer rapidement et avec une haute précision un grand nombre de spiraux dans une même pièce de matière.

Brève description des dessins

[0030] Les particularités et les avantages de la présente invention apparaîtront avec plus de détails dans le cadre de la description qui suit avec deux exemples de réalisation donnés à titre illustratif et non limitatif en référence aux cinq figures ci-annexées qui représentent :

- La figure 1 représente une vue schématique du dessus d'un ressort spiral ;
- La figure 2a représente une vue en coupe transversale d'un ressort spiral ;
- La figure 2b représente une vue en coupe longitudinale d'un ressort spiral ;
- La figure 3 représente un procédé de fabrication de spiraux horlogers selon un premier mode de réalisation de la présente invention ; et
- La figure 4 représente un procédé de fabrication de spiraux horlogers selon un deuxième mode de réalisation de la présente invention.

Description détaillée

[0031] La figure 1 présente une vue schématique du dessus d'un ressort spiral 1 et les figures 2a et 2b illustrent respectivement une vue en coupe transversale et une vue en coupe longitudinale du ressort spiral 1. Le ressort spiral 1 comprend un brin 2 qui, comme illustré dans la figure 1, a une forme hélicoïdale, ou en spirale, et comprend au moins une spire de section rectangulaire d'épaisseur e et de hauteur h . On comprendra cependant que la géométrie du brin peut être autre que celle illustrée dans cet exemple, par exemple, le brin 2 peut avoir une section carrée. La longueur totale du brin 2 est définie comme étant la longueur L .

[0032] Le brin 2 peut être fabriqué par exemple à partir d'une plaquette S (non montrée ici) de silicium monocristallin, avec une orientation telle que $\{001\}$, $\{111\}$ ou autre, ou encore il peut être fabriqué dans un matériau polycristallin ou amorphe. Ou encore il peut être fabriqué dans un silicium dopé, de préférence avec un dopage élevé au bore ou au phosphore, ou encore un dopage correspondant à une résistivité plus petite que $0.01 \text{ ohm}\cdot\text{cm}$, ou encore une résistivité de $0.005 \text{ ohm}\cdot\text{cm}$. Typiquement les caractéristiques de matériau décrites ci-dessus sont préférentiellement utilisées pour les spiraux en silicium mais également pour tous les composants horlogers en silicium. Plus précisément les composants horlogers sont, entre autre, des ancres ou des roues d'échappement. Le choix d'utiliser ces types de dopage sont motivés notamment par des expériences et par les recherches publiées dans les articles :

„Effects of heavy phosphorus-doping on mechanical properties of Czochralski silicon“, Z. Zeng et al., Journal of applied physics, 107, 123503, 2010.
et :

„Measurement of fracture stress, young's modulus, and intrinsic stress of heavily boron-doped silicon microstructures“, K. Najafi et K. Szuki, Thin Solid Films, 181, 1-2, 1989.

[0033] Comme mentionné ci-dessus, la raideur C du spiral 1 est liée au module d'élasticité E de la pièce de matière à partir de laquelle le spiral 1 est fabriqué, à son épaisseur e , à sa hauteur h et à sa longueur L selon la formule (1).

$$C = \frac{E \times h \times e^3}{12 \times L} \quad (1)$$

[0034] Avec les méthodes modernes de fabrication, il est possible d'atteindre une grande précision dans les dimensions géométriques du spiral 1. En d'autres termes, l'épaisseur e , la hauteur h et la longueur L peuvent être prédéterminés avec grande précision. La dispersion des valeurs de la raideur C de spiraux horlogers tous fabriqués selon le même motif géométrique est, ainsi, principalement attribuée à des valeurs différentes du module d'élasticité E de la pièce de matière, par exemple des plaquettes S de silicium, et ceci même si les pièces de matière semblent toutes être identiques.

[0035] La figure 3 illustre un procédé de fabrication 10 de spiraux horlogers, permettant d'atteindre des spiraux ayant tous une raideur C prédéterminée, selon un premier mode de réalisation de la présente invention. Le procédé 10 comprend les étapes 11 à 15 de :

11 : Fabriquer un nombre n de masques lithographiques M pour spiraux d'une longueur L et d'une hauteur h prédéterminées et correspondants à des spiraux de différentes épaisseurs e ;

12 : Déterminer le module d'élasticité E d'une plaquette de silicium S à partir de laquelle les spiraux vont être fabriqués ;

13 : Déterminer sur la base de E , h et L l'épaisseur e qui correspond à la raideur C des spiraux recherchée ;

14 : Déterminer parmi les n masques lithographiques fabriqués le masque M qui correspond à l'épaisseur e ; et

15 : Utiliser le masque M pour fabriquer les spiraux dans la plaquette de silicium S .

[0036] Grâce au procédé de fabrication selon le premier mode de réalisation de la présente invention, il est possible de fabriquer des spiraux en silicium ayant tous une raideur C dans une plage de valeurs prédéterminée et ceci même si les

plaquettes S de silicium à partir desquelles les spiraux sont fabriqués ont des modules d'élasticité E différents. En effet, et en se référant à la formule (1) ci-dessus, si h et L sont des paramètres géométriques qui sont prédéterminés et identiques pour tous les spiraux qui doivent être fabriqués, il est possible de déterminer quelle épaisseur e correspond à la raideur C recherchée. En d'autres termes le masque lithographique M correspondant à l'épaisseur e est déterminé sur la base de la valeur de E et ce masque est utilisé pour la fabrication des spiraux à partir de la plaquette de silicium S dont la valeur E a été déterminée. Lorsqu'une autre plaquette doit être utilisée, par exemple parce que la première a été utilisée, le module d'élasticité E de cette nouvelle plaquette est déterminé et le masque correspondant à l'épaisseur e, respectivement la raideur C, recherchée est utilisé.

[0037] La détermination de l'épaisseur e correspondant à la raideur C déterminée pendant l'étape 13 se fait de manière avantageuse sur la base de la formule (1). De manière avantageuse, l'étape 14 se fait à l'aide d'un tableau de correspondance de masque lithographique correspondant au module d'élasticité E et permettant d'obtenir des spiraux ayant une raideur C dans une plage déterminée.

[0038] L'étape 12 et donc la détermination du module d'élasticité E de la plaquette S, par exemple une plaquette de silicium, peut se faire, entre autre, par nanoindentation, par la mesure de la résistivité ou par la mesure d'un prélèvement d'une structure flexible ou oscillante.

[0039] L'étape 15 de fabrication en tant que telle des spiraux peut être effectuée par n'importe quelle méthode appropriée telle que la gravure DRIE. Bien que la gravure DRIE produise en général un léger angle par rapport à la perpendiculaire à la base de la plaquette de silicium, la répétabilité de e est suffisante entre les plaquettes afin d'obtenir une dispersion de la raideur C suffisamment petite.

[0040] Comme illustré dans la figure 3, le procédé de fabrication 10 peut comprendre une étape ou plusieurs étapes de finition 16, par exemple une étape d'oxydation et/ou désoxydation du spiral dite de lissage qui permet d'éliminer les marques de gravure et/ou une étape d'oxydation dite de thermo-compensation qui permet de créer une couche de silicium dioxyde thermocompensant autour du brin 2 du spiral 1.

[0041] Si des étapes d'oxydation et/ou désoxydation sont prévues dans le procédé de fabrication 10, la valeur de la raideur C du spiral fabriqué selon les étapes 11 à 15 peut être déterminée en prenant en compte la modification de la valeur de la raideur C lors des étapes de finition 16.

[0042] La figure 4 illustre un procédé de fabrication 20 de spiraux horlogers, permettant d'atteindre des spiraux ayant tous une raideur C prédéterminée, selon un deuxième mode de réalisation de la présente invention. Le procédé 20 comprend les étapes 21 à 24 de :

21 : Déterminer le module d'élasticité E de la plaquette de silicium S à partir de laquelle les spiraux doivent être fabriqués ;

22 : Déterminer sur la base de E, h et L l'épaisseur e qui correspond à la raideur C des spiraux recherchée ;

23 : Fabriquer un masque lithographique M pour fabriquer un spiral d'une longueur L et d'une hauteur h prédéterminées et correspondant à l'épaisseur e déterminée à l'étape précédente ;

24 : Utiliser le masque lithographique M fabriqué à l'étape précédente pour fabriquer les spiraux dans la plaquette de silicium S.

[0043] De manière similaire au procédé 10, le procédé de fabrication 20 peut comprendre une étape ou plusieurs étapes de finition 25, par exemple une étape d'oxydation et/ou désoxydation des spiraux dite de lissage qui permet d'éliminer les marques de gravure et/ou une étape d'oxydation dite de thermo-compensation qui permet de créer une couche de silicium dioxyde thermocompensant autour du brin 2 du spiral 1.

[0044] Si des étapes d'oxydation et/ou désoxydation sont prévues dans le procédé de fabrication 20, la valeur de la raideur C du spiral fabriqué selon les étapes 21 à 24 peut être déterminée en prenant en compte la modification de la valeur de la raideur C lors des étapes de finition 25.

[0045] Contrairement au procédé de fabrication 10, il est prévu dans le procédé de fabrication 20 de fabriquer le masque de lithographie M correspondant à l'épaisseur e de façon ad hoc. Cela permet d'utiliser des plaquettes S ayant des modules d'élasticité E très différents. En effet, pour chaque plaquette S le module d'élasticité E est déterminé. L'épaisseur e du spiral correspondant à la raideur C prédéterminée peut être alors, sur la base de la formule (1) et du module d'élasticité E, déterminée et le masque M nécessaire fabriqué. Bien entendu, si un masque lithographique correspondant au motif géométrique du spiral et à l'épaisseur e est déjà à disposition ce masque peut être utilisé. En d'autres termes l'étape 23 peut être dans ce cas de figure omise.

[0046] Il est évident que la présente invention est sujette à de nombreuses variations quant à sa mise en oeuvre. Bien que deux modes de réalisation non limitatifs aient été décrits à titre d'exemple, on comprend bien qu'il n'est pas concevable d'identifier de manière exhaustive toutes les variations possibles. Il est bien sûr envisageable de remplacer un moyen décrit par un moyen équivalent sans sortir du cadre de la présente invention. Toutes ces modifications font partie des

connaissances communes d'un homme du métier dans le domaine technique de la fabrication de spiraux horlogers par des méthodes de micro/nano fabrication.

[0047] De plus, un homme du métier reconnaîtra sans peine que le procédé de fabrication de la présente invention peut aussi être appliqué pour fabriquer toutes sortes de structures oscillantes, tel que par exemple des diapasons ayant une raideur dans une plage déterminée.

Revendications

1. Procédé de fabrication de spiraux horlogers (1) d'une longueur L, d'une hauteur h prédéterminées et d'une raideur C recherchée, comprenant les étapes :
 - a. Déterminer le module d'élasticité E de la pièce de matière à partir de laquelle les spiraux horlogers (1) sont fabriqués ;
 - b. Déterminer sur la base du module d'élasticité E, de la hauteur h et de la longueur L, l'épaisseur e des spiraux horlogers (1) correspondant à la raideur C recherchée ;
 - c. Fabriquer les spiraux horlogers (1) de dimensions h, L, et e.
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la pièce de matière est sous forme d'une plaquette S, en particulier une plaquette S à base de silicium et avantageusement une plaquette de type SOI.
3. Procédé selon l'une des revendications 1 ou 2, dans lequel les spiraux horlogers (1) sont fabriqués à l'étape c. en utilisant un masque lithographique M.
4. Procédé selon la revendication 3, dans lequel un nombre n de masques lithographiques M ($M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_n$) et correspondant à n épaisseurs e ($e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_n$) sont fabriqués avant une des étapes a. ou b.
5. Procédé selon la revendication 4, dans lequel l'étape c. est effectuée en utilisant le masque lithographique M, correspondant à l'épaisseur e déterminée à l'étape b.
6. Procédé selon la revendication 3, dans lequel le masque lithographique M correspondant à l'épaisseur e est fabriqué après l'étape b.
7. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, comprenant une ou plusieurs étapes de finition, par exemple une ou plusieurs étapes d'oxydation et/ou de désoxydation et/ou une étape de libération des spiraux de la plaquette.
8. Procédé selon la revendication 7 comprenant, après l'opération de libération de la partie gravée du wafer SOI contenant les composants reliés à cette partie gravée par une attache, une étape d'oxydation de thermo-compensation.
9. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les spiraux libérés sont liés les uns aux autres par une attache à une épargne et que les spiraux sont détachés de leur épargne après une étape d'oxydation de thermo-compensation.
10. Procédé selon l'une des revendications 7 ou 8, dans lequel l'épaisseur e déterminée à l'étape b. prend en compte la valeur module d'élasticité E des spiraux après une ou plusieurs étapes de finition.
11. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le module d'élasticité E est déterminé à l'étape a. par nanoindentation, par mesure de la résistivité électrique, par mesure d'un prélèvement d'une structure flexible oscillante dans la pièce de matière ou par une combinaison de ces méthodes.
12. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'épaisseur e est déterminée à l'étape b. grâce à la formule :

$$e = \sqrt[3]{\frac{C \times 12 \times L}{E \times h}}$$

13. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les spiraux horlogers (1) sont fabriqués à l'étape c. par gravure, plus particulièrement par gravure ionique réactive profonde.

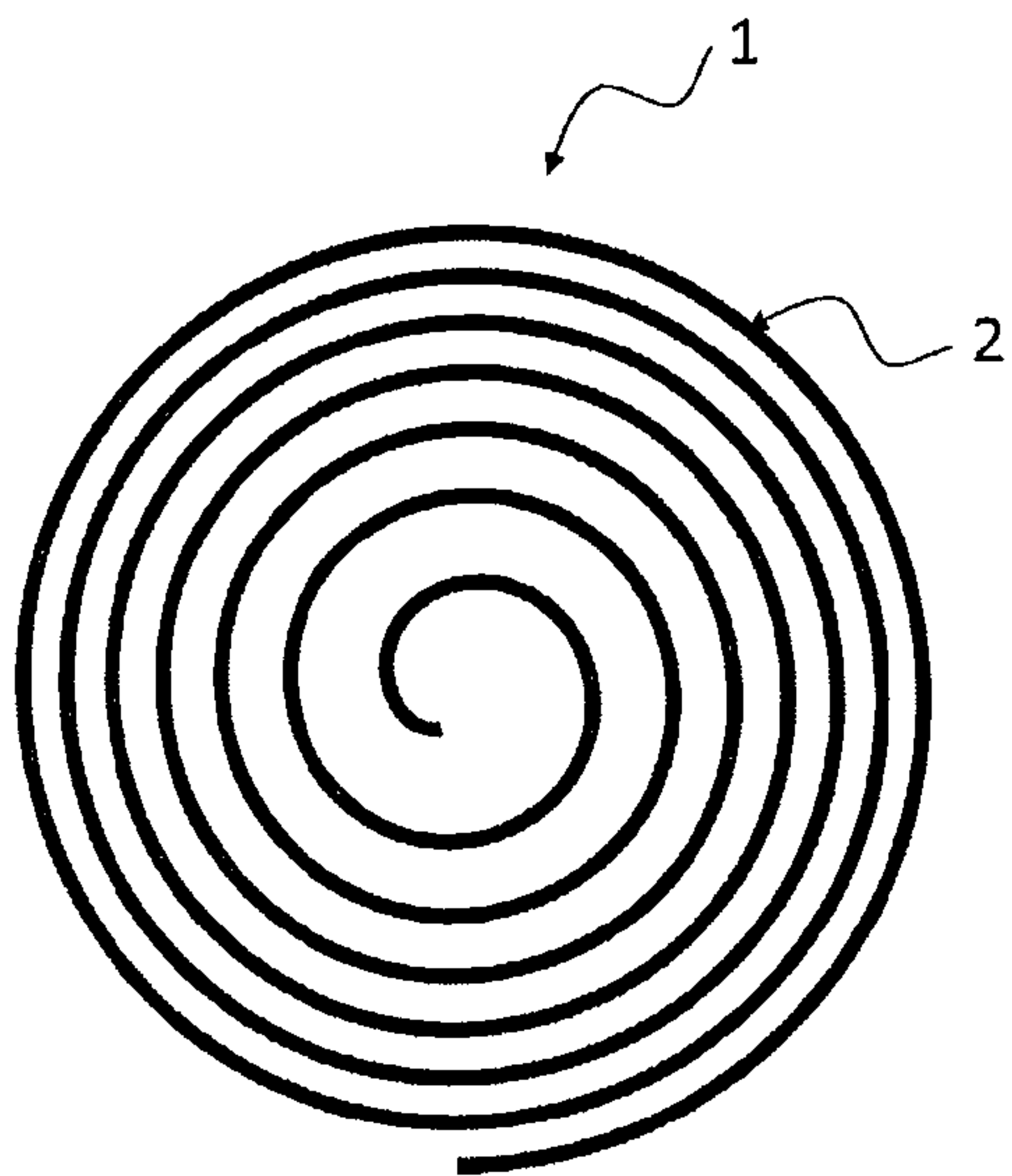


Fig. 1

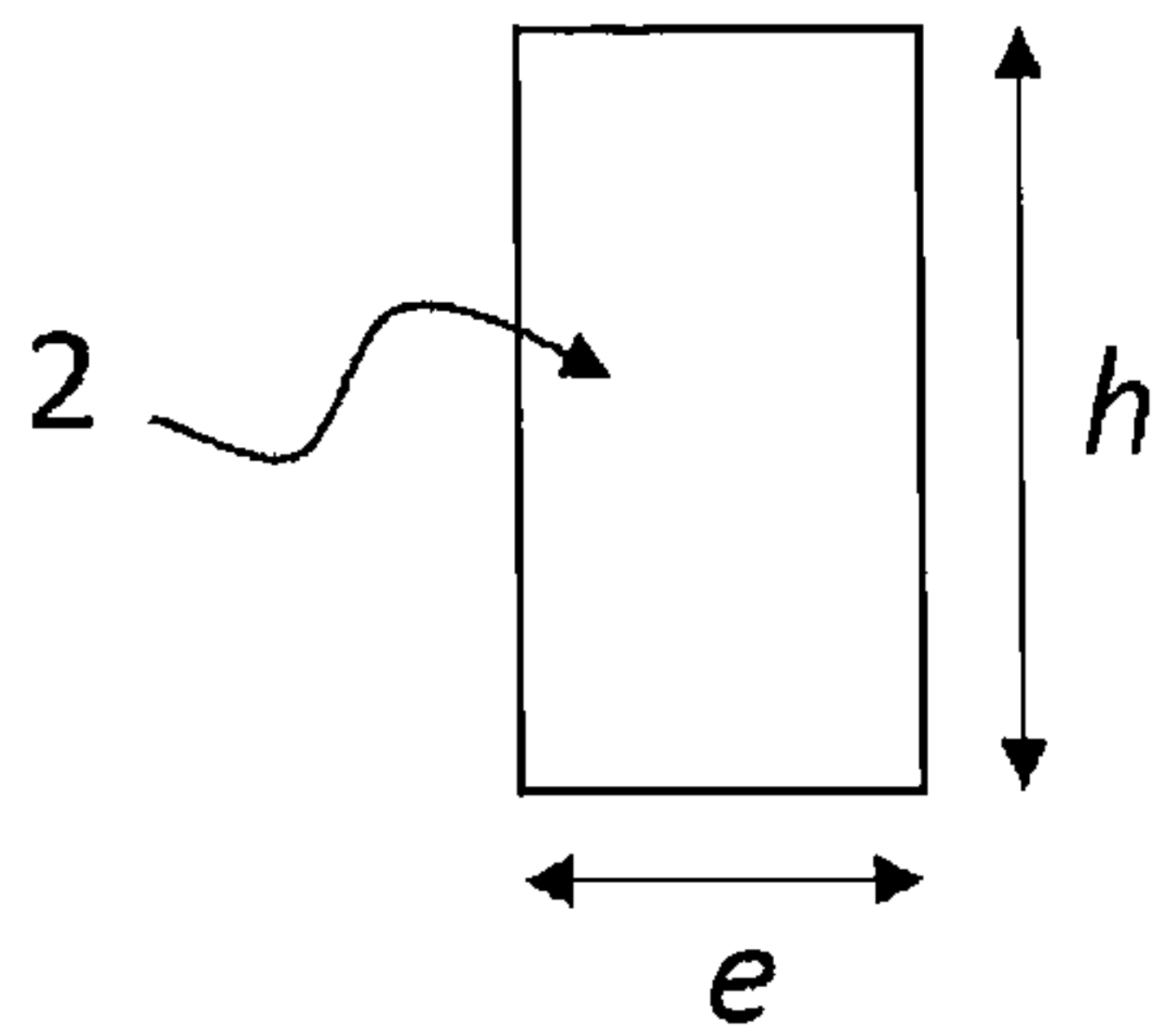


Fig. 2a

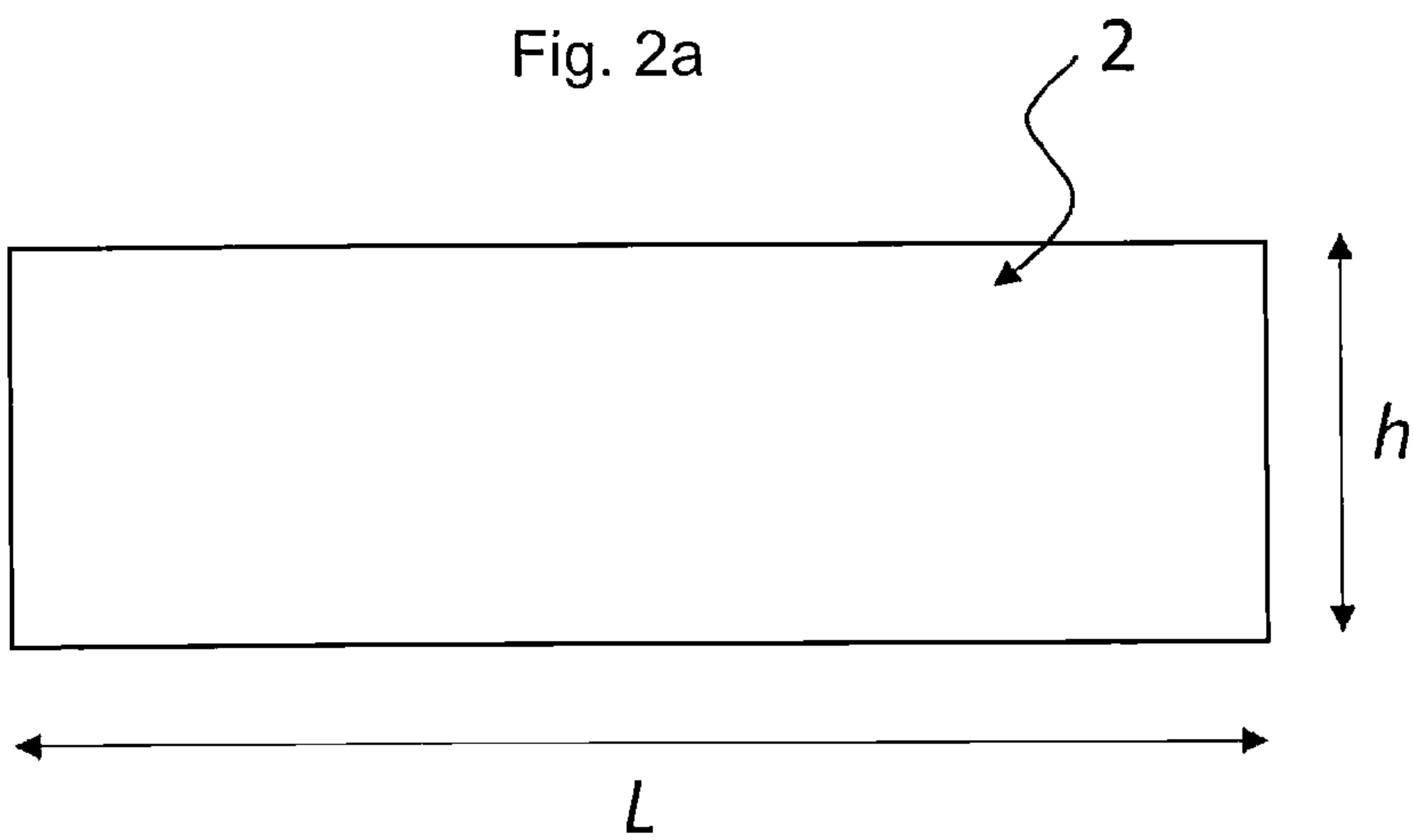


Fig. 2b

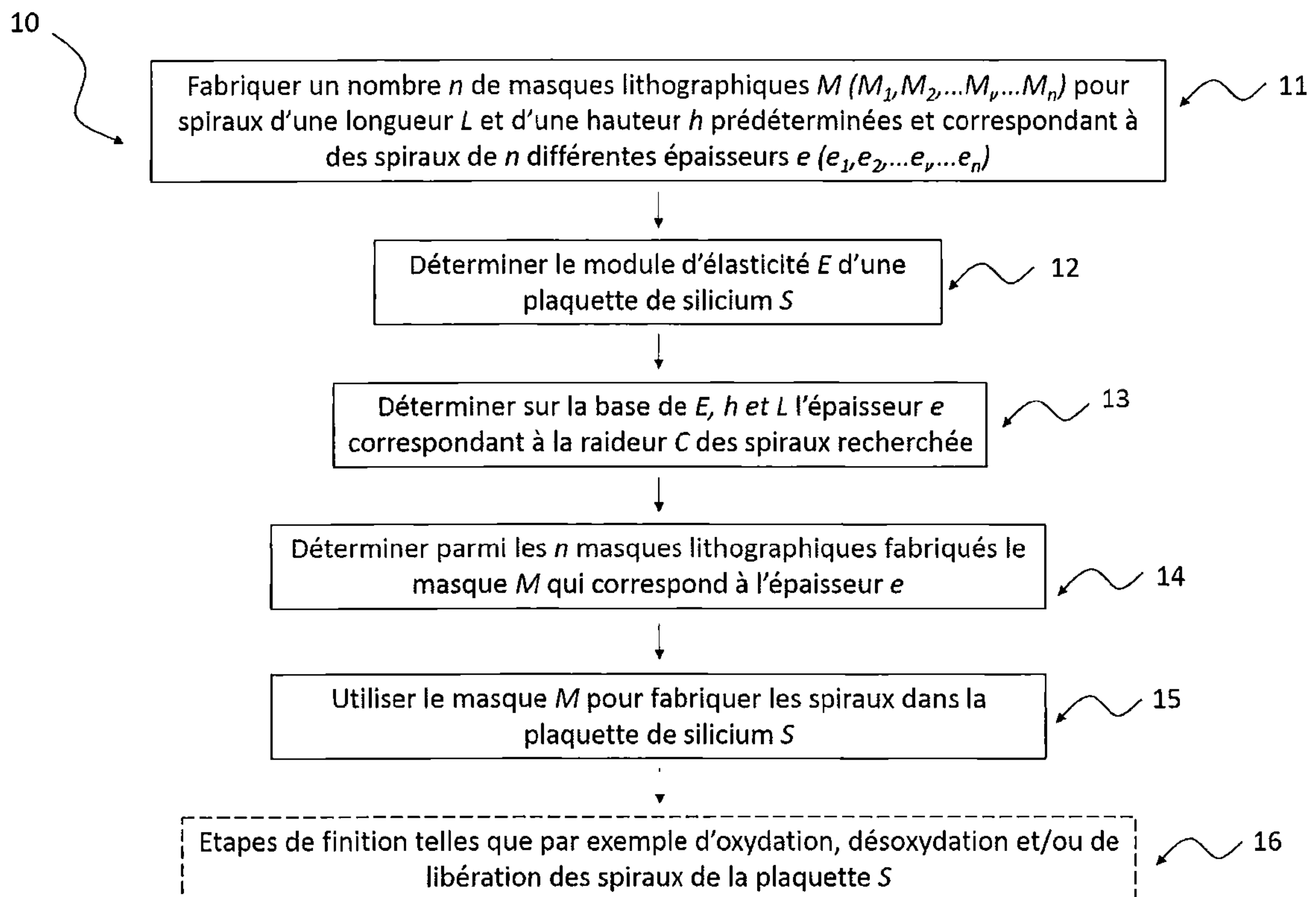


Fig. 3

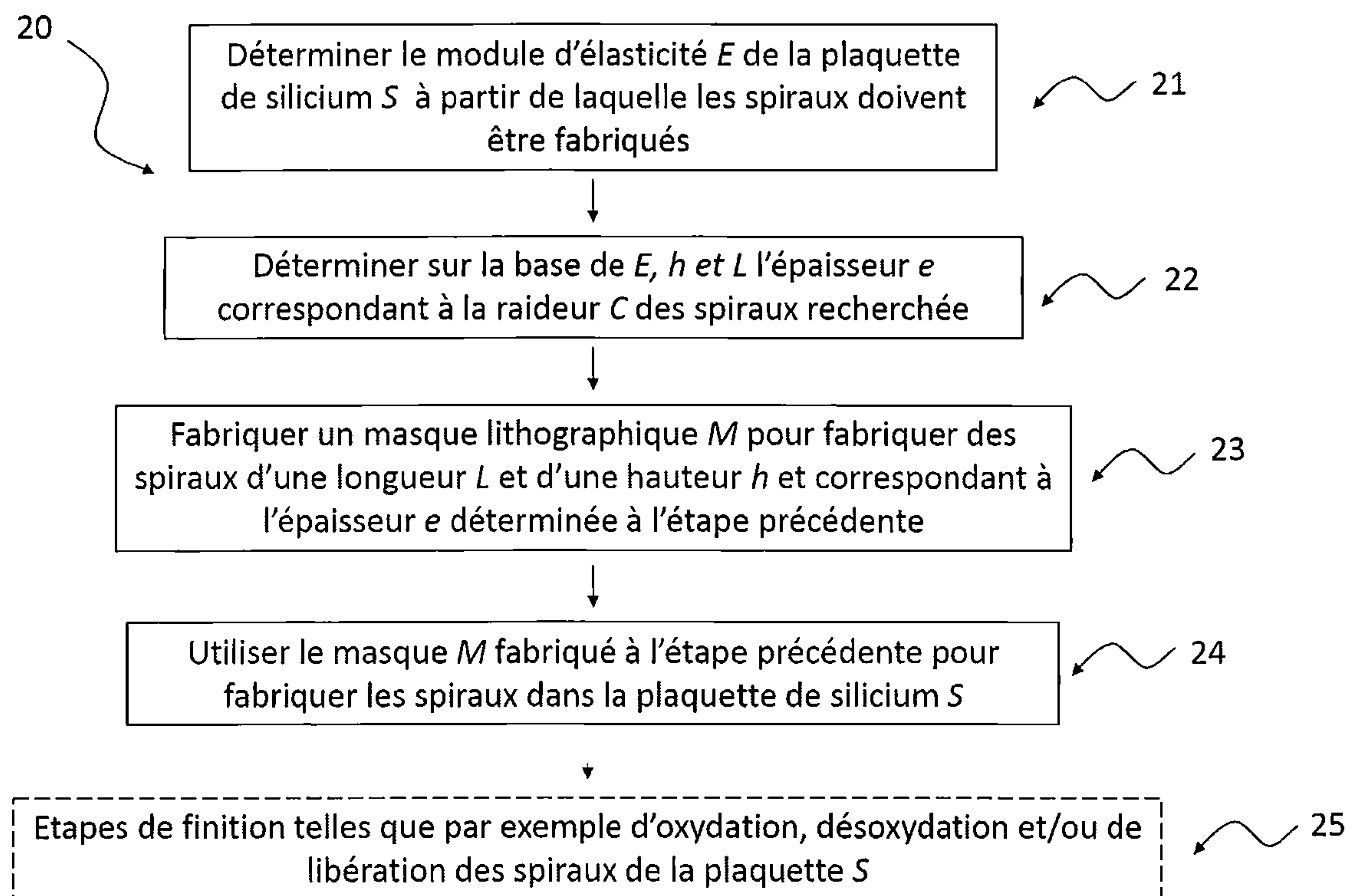


Fig. 4