

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

①① N° de publication :

3 131 291

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

②① N° d'enregistrement national :

21 14499

⑤① Int Cl⁸ : **B 81 B 3/00** (2022.01), **B 81 C 1/00**

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②② Date de dépôt : 24.12.21.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public de la
demande : 30.06.23 Bulletin 23/26.

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

⑥③ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *Commissariat à l'Energie Atomique et
aux Energies Alternatives Etablissement public à carac-
tère industriel et commercial* — FR.

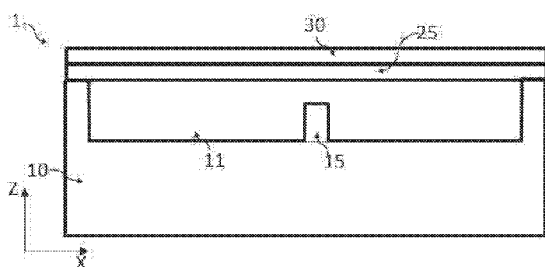
⑦② Inventeur(s) : FAIN Bruno.

⑦③ Titulaire(s) : Commissariat à l'Energie Atomique et
aux Energies Alternatives Etablissement public à carac-
tère industriel et commercial.

⑦④ Mandataire(s) : INNOV-GROUP.

⑤④ Procédé de fonctionnalisation d'une membrane d'un capteur électromécanique résonant.

⑤⑦ Capteur électromécanique (1), comportant :
une membrane (25), suspendue sur une cavité, ménagée dans un substrat (10) ; un empilement piézoélectrique (30), porté par la membrane ;
le capteur étant tel que :
la cavité comporte au moins une butée, s'étendant à partir du fond de la cavité, vers la membrane, jusqu'à une extrémité, l'extrémité étant disposée à une hauteur (h), par rapport au fond, inférieure à la profondeur de la cavité (d2).
Figure 2A.



FR 3 131 291 - A1



Description

Titre de l'invention : Procédé de fonctionnalisation d'une membrane d'un capteur électromécanique résonant

Domaine technique

[0001] L'invention concerne des microcapteurs électromécaniques résonants.

ART ANTERIEUR

[0002] Les transducteurs micro-usinés de type (pMUT : piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers) sont capables d'émettre et de recevoir des ondes acoustiques, en particulier ultrasonores, grâce à une membrane comprenant un matériau piézoélectrique. La membrane est en général circulaire, et formée d'une superposition d'une couche de SiO_2 (oxyde de silicium) ou de Si_3N_4 (nitrure de silicium), et d'un assemblage piézoélectrique formé d'une première couche métallique en Mo (molybdène) ou Pt (Platine), d'une couche mince de matériau piézoélectrique, par exemple AlN (nitrure d'aluminium), ZnO (oxyde de zinc) ou PZT (titano zirconate de plomb), d'une deuxième couche métallique, par exemple en Mo ou en AlCu .

[0003] Un transducteur pMUT permet de générer des ondes ultrasonores, résultant de la flexion de la membrane sous l'effet d'une excitation électrique à une fréquence de résonance de la membrane. Un transducteur pMUT permet également la réception des ondes ultra-sonores qui s'effectue grâce à l'effet piézoélectrique. La plage de fréquence accessible pour les pMUTs est généralement comprise entre 20 kHz et 200 MHz. Le diamètre de la partie active de la membrane s'étend entre plusieurs millimètres et 2 μm .

[0004] Les transducteurs PMUT sont performants pour émettre ou détecter des ondes ultrasonores en milieu gazeux (par exemple dans l'air) ou en milieu liquide. Ils peuvent être appliqués dans des domaines variés, par exemple le médical, en particulier l'échographie, ou les détecteurs d'obstacles, par exemple dans l'automobile.

[0005] Un procédé de fabrication adapté à l'obtention de transducteurs PMUT est le scellement (wafer bonding), selon lequel on scelle un substrat supérieur sur un substrat inférieur, une cavité ayant été préalablement formée dans le substrat inférieur. Le scellement est effectué sous vide, afin d'éviter un effet d'amortissement dû à la présence d'air. Le substrat supérieur est ensuite aminci, de façon à former une membrane. L'assemblage piézoélectrique (première couche métallique, couche piézoélectrique et deuxième couche métallique) est ensuite déposé sur la membrane. Dans ce procédé, les dimensions latérales des cavités sont très bien définies par une étape de photolithographie / gravure en face avant. D'autres procédés de fabrication ne comportent pas de scellement sur cavités, la membrane étant formée par gravure

profonde (DRIE pour deep Reactive Ion Etching – gravure ionique réactive profonde) de la face arrière du substrat. Les dimensions latérales des membranes sont alors mal contrôlées, avec une erreur sur la dimension latérale qui peut dépasser les 5%.

- [0006] La [Fig.1A] représente un substrat supérieur S_{sup} scellé sur un substrat inférieur S_{inf} . Une cavité C a été ménagée dans le substrat inférieur avant le scellement. Après amincissement du substrat supérieur, on peut obtenir une membrane M. Sous l'effet du différentiel de pression entre la pression atmosphérique extérieure et le vide de la cavité, la membrane est défléchie vers l'intérieur de la cavité. Cela entraîne un risque de rupture, d'autant plus grand que la taille latérale de la membrane est grande et que son épaisseur est faible.
- [0007] La taille de la membrane définit la fréquence de fonctionnement du transducteur. Dans certaines applications, par exemple dans la détection d'obstacles, la fréquence de résonance est de quelques dizaines de quelques kHz, par exemple 40 kHz. Pour adresser de telles fréquences, la taille de la membrane (diamètre ou plus grande diagonale), est de préférence supérieure à quelques centaines de μm , voire quelques millimètres.
- [0008] Le procédé par scellement est bien adapté pour les membranes de petite taille (inférieure à 100 μm), en raison des risques de rupture. Pour obtenir des membranes de taille plus élevée, par exemple supérieure à 500 μm , on peut mettre en œuvre une gravure d'un substrat, par une face arrière, de façon à former une membrane sur une face avant, opposée à la face arrière. Ce procédé est usuellement désigné « gravure face arrière ». Cependant, un tel procédé ne permet pas un contrôle précis de la largeur de la cavité C. Il en résulte une incertitude sur le diamètre de la membrane formée suite à la gravure.
- [0009] Un enjeu est donc la réalisation de transducteurs pMUT, mettant en œuvre un procédé de scellement de deux substrats, puis l'amincissement du substrat supérieur, de manière à bien contrôler la taille latérale des membranes, dans une gamme de dimensions étendues, pouvant être supérieures à 100 μm . Cela correspond, de manière approximative, à une fréquence de fonctionnement entre 300 kHz et 1 MHz. L'inventeur propose un procédé de fabrication permettant d'éviter une rupture des membranes de grandes dimensions au cours de leur fabrication, de façon à produire des membranes larges, dont la fréquence de résonance est inférieure à 1 MHz ou inférieure à 300 kHz.

Exposé de l'invention

- [0010] Un premier objet de l'invention est capteur électromécanique, comportant :
- [0011] – une membrane, suspendue sur au moins une cavité, ménagée dans un substrat, la cavité s'étendant entre la membrane et un fond, la distance entre la

- membrane et le fond formant une profondeur de la cavité;
 - un empilement piézoélectrique, porté par la membrane, et comportant une couche d'un matériau piézoélectrique s'étendant entre une première couche conductrice et une deuxième couche conductrice;
- [0012] le capteur étant tel que :
- [0013] – la membrane est susceptible de vibrer sous l'effet d'une tension alternative, ou d'un courant alternatif, entre la première couche conductrice et la deuxième couche conductrice ;
- et/ou la membrane, sous l'effet d'une vibration, est susceptible de générer une tension alternative, ou un courant alternatif, entre la première couche conductrice et la deuxième couche conductrice ;
- [0014] le capteur étant caractérisé en ce que :
- [0015] – la cavité comporte au moins une butée, s'étendant à partir du fond de la cavité, vers la membrane, jusqu'à une extrémité, l'extrémité étant disposée à une hauteur, par rapport au fond, inférieure à la profondeur de la cavité;
- la membrane s'étend selon une épaisseur;
- la hauteur de la butée correspond à la profondeur de la cavité diminuée de k fois l'épaisseur de la membrane, où k est un réel compris entre 0.5 et 3 ou entre 0.5 et 2.
- [0016] Le capteur peut comporter l'une des caractéristiques suivantes, prises isolément ou selon les combinaisons techniquement réalisables.
- [0017] – La membrane s'étend, en dessus de la cavité, selon un diamètre ou une diagonale supérieure à 100 μm .
- La cavité comporte plusieurs butées et chaque butée s'étend, à partir du fond de la cavité, vers la membrane, jusqu'à une extrémité, l'extrémité étant disposée à une hauteur, par rapport au fond, inférieure à la profondeur de la cavité. Au moins deux butées différentes peuvent avoir deux hauteurs différentes. De préférence, la hauteur des butées est d'autant plus faible que la butée est proche d'une zone médiane de la cavité.
- L'empilement piézoélectrique comporte une partie centrale à l'aplomb d'une zone médiane de la cavité, et une partie périphérique autour de la partie centrale, le capteur étant tel qu'une portion de la partie périphérique ne comporte pas de couche de matériau piézoélectrique.
- Plusieurs cavités sont formées sous un même empilement piézoélectrique.
- [0018] Un deuxième objet de l'invention est un procédé de fabrication d'un capteur électromécanique selon le premier objet de l'invention, le procédé comportant les étapes suivantes:
- [0019] – a) gravure d'une cavité dans un substrat inférieur, le substrat inférieur

- s'étendant entre une face inférieure et une face supérieure, la cavité débouchant sur la face supérieure;
- b) scellement d'un substrat supérieur sur la face supérieure du substrat inférieur, de façon à fermer la cavité;
 - c) amincissement du substrat supérieur, de façon à former la membrane du capteur;
 - d) formation d'un empilement piézoélectrique sur la membrane, l'empilement piézoélectrique comportant une couche d'un matériau piézoélectrique s'étendant entre une première couche conductrice et une deuxième couche conductrice;
- [0020] le procédé étant caractérisé en ce qu'il comporte, préalablement à l'étape a), une prise en compte d'une épaisseur ;
- [0021] et en ce que l'étape a) comporte les sous-étapes suivantes:
- [0022] – a-1) première gravure du substrat inférieur, de façon à former une cavité, la cavité s'étendant, à partir de la face supérieure, jusqu'à un premier fond;
- a-2) définition d'au moins une surface d'appui sur le premier fond ;
- a-3) deuxième gravure du substrat inférieur, dans la cavité, autour de la surface d'appui, jusqu'à un deuxième fond, formant le fond de la cavité, de façon que suite à la deuxième gravure, la cavité comporte une butée, s'étendant à partir du fond de la cavité, vers la membrane, jusqu'à la surface d'appui, la surface d'appui formant une extrémité de la butée, l'extrémité étant disposée à une hauteur, par rapport au fond, inférieure à la profondeur de la cavité, la hauteur de la butée correspondant à la profondeur de la cavité diminuée de k fois l'épaisseur préalablement prise en compte, où k est un réel compris entre 0.5 et 3 ou entre 0.5 et 2 ;.
- [0023] et en ce que suite à l'étape c), l'épaisseur de la membrane correspond à la valeur d'épaisseur préalablement prise en compte, de façon que la surface d'appui limite une déflexion de la membrane à l'intérieur de la cavité.
- [0024] Selon un mode de réalisation,
- [0025] – la cavité s'étend, parallèlement à la face supérieure, selon un diamètre ou une diagonale;
- au moins une butée s'étend au niveau de la moitié du diamètre ou de la diagonale.
- [0026] Selon un mode de réalisation,
- [0027] – la cavité s'étend, parallèlement à la face supérieure, selon un diamètre ou une diagonale;
- plusieurs butées s'étendent le long du diamètre ou de la diagonale.
- [0028] Selon un mode de réalisation,

- [0029] – la portion d'appui définie lors de la sous-étape a-1), est une portion d'appui initiale;
- la deuxième gravure comporte :
- une gravure intermédiaire, jusqu'à un fond intermédiaire ;
 - une définition d'au moins une surface d'appui intermédiaire sur le fond intermédiaire ;
 - une gravure de la cavité autour de la surface d'appui intermédiaire et autour de la portion d'appui initiale, jusqu'au fond de la cavité ;
 - de façon que suite à la sous-étape a-3), la surface d'appui intermédiaire s'étend, par rapport au fond, à une hauteur inférieure à celle de la surface d'appui initiale.
- [0030] Selon un mode de réalisation, l'étape d) comporte :
- [0031] – dépôt de la première couche conductrice sur la membrane, de façon à former une première électrode ;
- dépôt de la couche du matériau piézoélectrique sur la première couche conductrice ;
- dépôt d'une deuxième couche conductrice sur la couche de matériau piézoélectrique, de façon à former une deuxième électrode.
- [0032] Selon un mode de réalisation, l'étape d) comporte également :
- [0033] – formation d'un premier contact électrique, à travers la couche de matériau piézoélectrique, pour polariser la première électrode ;
- formation d'un deuxième contact électrique pour polariser la deuxième électrode.
- [0034] Selon un mode de réalisation, le procédé comporte un retrait d'une partie de la deuxième électrode et du matériau piézoélectrique, à l'aplomb de la cavité, de façon à diminuer la rigidité de la membrane. Le retrait est réalisé de façon à maintenir une connexion électrique entre la deuxième électrode et le deuxième contact électrique.
- [0035] Selon un mode de réalisation, la membrane s'étend, sur une cavité, selon un diamètre ou une diagonale supérieure à 100 μm .
- [0036] L'invention sera mieux comprise à la lecture de l'exposé des exemples de réalisation présentés, dans la suite de la description, en lien avec les figures listées ci-dessous.

FIGURES

- [0037] La [Fig.1A] et la [Fig.1B] montrent des étapes d'un procédé de fabrication d'un capteur de type pMUT selon l'art antérieur.
- [0038] La [Fig.2A] représente un premier mode de réalisation d'un capteur pMUT selon l'invention
- [0039] La [Fig.2B] et la [Fig.2C] montrent le capteur schématisé sur la [Fig.2A], au cours de

deux étapes de fabrication.

[0040] La [Fig.2D] et la [Fig.2E] illustrent d'autres modes de réalisation d'un capteur pMUT selon l'invention.

[0041] Les figures 3A à 3O schématisent des étapes de fabrication d'un capteur pMUT selon l'invention.

[0042] La [Fig.4A] montre un mode de réalisation dans lequel la rigidité de l'empilement piézoélectrique, supporté par la membrane, est diminuée.

[0043] La [Fig.4B] et la [Fig.4C] représentent d'autres modes de réalisation de capteur pMUT selon l'invention.

EXPOSE DE MODES DE REALISATION PARTICULIERS

[0044] La [Fig.2A] schématise les principaux composants d'un capteur résonant 1 de type pMUT (piezoelectric Micro-machined Ultrasonic Transducers), qui constitue un type particulier de résonateur électromécanique MEMS. Le capteur est formé sur un substrat inférieur 10. Le capteur comporte une membrane 25 sur laquelle est déposée un empilement piézoélectrique 30. La membrane 25 s'étend sur une cavité 11 formée dans le substrat inférieur 10. L'empilement piézoélectrique 30 comporte une couche d'un matériau piézoélectrique comprise entre deux électrodes. De façon connue, sous l'effet d'une tension alternative entre les électrodes, la membrane peut entrer en vibration. De façon réciproque, sous l'effet d'une vibration de la membrane, une tension alternative ou un courant électrique apparaît entre les deux électrodes. Par ailleurs, l'empilement piézoélectrique 30 permet de rigidifier la membrane, de façon à limiter une déflexion de la membrane vers l'intérieur de la cavité 11.

[0045] Le capteur 1 comporte une butée 15, formée dans la cavité 11, s'étendant à partir du fond de la cavité. La butée est destinée à former une surface d'appui de la membrane 25 lorsque cette dernière subit une déflexion trop importante, sous l'effet du vide présent dans la cavité. Le fait que la cavité 11 soit sous vide évite la formation d'un coussin d'air dans la cavité, amortissant la vibration de la membrane lors de l'utilisation du capteur. L'empilement piézoélectrique 30 est déposé sur la membrane 25, après la formation de cette dernière. Comme indiqué dans l'art antérieur, la membrane est obtenue à partir d'un amincissement d'un substrat supérieur 20 assemblé sur le substrat inférieur 10, après la formation de la cavité 11. Le substrat supérieur 20 est par exemple assemblé au substrat inférieur 10 par scellement direct, sous-vide.

[0046] La membrane 25 est obtenue par amincissement du substrat supérieur 20, par exemple par gravure. La [Fig.2B] montre l'étape d'assemblage, sous vide, du substrat supérieur 20 sur le substrat inférieur 10. La [Fig.2C] montre la membrane 25 résultant de l'amincissement.

[0047] De façon alternative, le substrat supérieur a préalablement fait l'objet d'une implantation ionique. Le substrat supérieur est appliqué contre le substrat inférieur. Suite

à une phase de clivage du substrat supérieur, une couche résiduelle du substrat supérieur subsiste sur le substrat inférieur. La couche résiduelle ainsi obtenue forme la membrane suspendue sur le substrat inférieur.

- [0048] Lors de la formation de la membrane, par gravure ou par clivage, la cavité 11 est à une pression proche du vide. Cela permet de disposer d'une cavité considérée comme sous-vide, refermée par la membrane 25.
- [0049] La membrane forme une interface entre la cavité 11, sous vide, et l'environnement extérieur, à la pression atmosphérique. Comme mentionné dans l'art antérieur, lorsque le diamètre (ou la diagonale) de la membrane 25 augmente, du fait de la faible épaisseur de la membrane, cette dernière se défléchit vers l'intérieur de la cavité. Il en résulte un risque de casse. La [Fig.2C] représente une étape de formation du capteur 1, préalablement au dépôt de l'empilement piézoélectrique sur la membrane. Le risque de casse est important avant la formation de l'empilement piézoélectrique, ce dernier augmentant la rigidité de la membrane.
- [0050] Il est préférable que l'amplitude de la déflexion de la membrane n'excède pas deux ou trois fois l'épaisseur de la membrane. La hauteur de la butée 15 est ajustée en conséquence. La butée 15 permet de limiter l'amplitude de la déflexion de la membrane, et d'éviter une casse de cette dernière. Dans cet exemple, on a représenté une butée disposée au centre la cavité, de façon à permettre un appui de la membrane à l'endroit auquel la déflexion est maximale. D'autres configurations sont possibles.
- [0051] Sur la [Fig.2D], on a représenté une cavité présentant plusieurs butées, réparties selon une direction parallèle à la face supérieure 10_s. Les butées peuvent avoir différentes hauteurs h comme représenté sur la [Fig.2E], chaque hauteur h étant définie par rapport au fond de la cavité 11. Selon ce mode de réalisation, la hauteur est d'autant plus faible que la butée est disposée proche du centre de la cavité, ce dernier étant matérialisé par un trait mixte sur la [Fig.2E]. La surface des butées, sur laquelle s'appuie la membrane, est suffisamment importante pour limiter la déflexion de la membrane. Cependant, elle ne doit pas être trop élevée, de façon à limiter un risque d'adhérence de la membrane 25 suite au dépôt de l'assemblage piézoélectrique 30.
- [0052] Les figures 3A à 3O schématisent les principales étapes d'un procédé de fabrication d'un capteur pMUT selon l'invention.

Formation de la cavité

- [0053] On dispose d'un substrat inférieur 10, par exemple un substrat de silicium, s'étendant entre une face supérieure 10_s et une face inférieure 10_i. Cf. [Fig.3A]. Le substrat inférieur 10 fait l'objet d'une première gravure, selon une première profondeur d₁, de manière à former un premier fond 14₁, comme représenté sur la [Fig.3B]. La première profondeur d₁ est par exemple comprise entre 500 nm et 3 µm.
- [0054] Les figures 3A à 3O sont des coupes effectuées selon un plan transversal XZ, perpen-

diculaire à la face supérieure 10_s. L'échelle selon l'axe transversal Z est supérieure à l'échelle selon l'axe X.

[0055] Suite à la première gravure, on définit au moins une surface d'appui 13 sur le premier fond 14₁. La surface d'appui est destinée à former, par la suite, un appui pour une membrane défléchie.

[0056] Le procédé comporte une deuxième gravure, dans la cavité 11, la deuxième gravure étant effectuée autour de la surface d'appui 13. La deuxième gravure n'affecte pas, ou de façon négligeable, la profondeur d₁ de la surface d'appui 13 par rapport à la face supérieure 10_s. Le résultat de la deuxième gravure est exposé sur la figure 3C. La cavité 11 s'étend, à partir de la face supérieure 10_s, jusqu'à un fond 14, le fond s'étendant à une deuxième profondeur d₂ par rapport à la face supérieure 10_s. La deuxième profondeur d₂ est supérieure à la première profondeur d₁. La première profondeur d₁ est égale à k fois l'épaisseur ε de la membrane que l'on souhaite former ultérieurement, k étant un réel de préférence compris entre 0.5 et 3, et de préférence entre 0.5 et 2.

Ainsi :

[0057] $d_1 = k\varepsilon$, avec de préférence $0.5 \leq k \leq 3$.

[0058] La deuxième profondeur d₂ est de préférence comprise 2 μm et 25 μm , de préférence entre 5 μm et 15 μm , par exemple 10 μm . La deuxième profondeur d₂ correspond à la profondeur de la cavité 11.

[0059] La deuxième gravure permet de former au moins une butée 15 dans la cavité, la ou chaque butée s'étendant à partir du fond 14 de la cavité jusqu'à une surface d'appui 13, cette dernière étant disposée à une profondeur d₁ par rapport à la face supérieure 10_s. Chaque surface d'appui 13 correspond à l'extrémité d'une butée 15. La profondeur d₂ de chaque cavité est de préférence au moins 5 fois le diamètre ou la diagonale d'une butée, le diamètre ou la diagonale étant déterminée selon une direction parallèle à la face supérieure 10_s. Le diamètre ou la diagonale d'une butée 15 est par exemple compris entre 0.25 μm et 5 μm .

Formation de la membrane

[0060] Les figures 3D et 3E montrent respectivement un substrat supérieur 20, ce dernier étant assemblé sur la face supérieure 10_s du substrat inférieur 10, de préférence par scellement moléculaire sous vide. Le substrat supérieur 20 peut être un substrat de type SOI (Silicon on Insulator – Silicium sur isolant), comportant un empilement de couches : Si (couche superficielle 21) – SiO₂ (couche 22) – Si (couche 23). De façon alternative, le scellement peut être un scellement anodique ou eutectique. L'étape de scellement peut être précédée d'une préparation des surfaces de chaque substrat assemblées l'une à l'autre. La préparation des surfaces comprend par exemple le dépôt de matériaux spécifiques nécessaires au scellement anodique ou au scellement eutectique.

- [0061] L'assemblage du substrat supérieur 20 sur le substrat inférieur 10 permet de refermer la cavité 11, cette dernière étant sous vide.
- [0062] La figure 3F illustre la formation de la membrane 25, par amincissement du substrat supérieur 20. L'amincissement peut être effectué par gravure, par exemple une gravure mécanique d'une partie de la couche 23 suivie d'une gravure chimique d'une partie de la couche 23 et de la couche 22, de manière à préserver la couche superficielle 21, qui forme la membrane 25. L'épaisseur de la membrane 25 est de l'ordre de quelques pourcents de son diamètre (ou de sa diagonale), le diamètre et la diagonale étant déterminé parallèlement à la face supérieure 10_s. L'épaisseur ϵ de la membrane 25 est ainsi comprise entre 100 nm et 10 μ m, et le plus souvent entre 500 nm et 5 μ m.
- [0063] La membrane 25 forme une interface entre la cavité 11 sous vide et l'air extérieur, à la pression atmosphérique. Sous l'effet de la différence de pression, la membrane 25 tend à se défléchir pour s'appuyer contre la butée 15, ou plus précisément contre la surface d'appui 13 formant l'extrémité de chaque butée. On rappelle que l'échelle selon l'axe Z est plus élevée que l'échelle selon l'axe X.
- [0064] La [Fig.3G] représente une étape alternative à la gravure. Selon cette étape, le substrat supérieur 20 a fait l'objet d'une implantation ionique, matérialisée par une ligne en pointillés. Le substrat supérieur 20 fait l'objet d'un clivage, de façon à ne laisser subsister qu'une couche résiduelle, formant la membrane 25, sur le substrat inférieur 10.
- [0065] Formation de l'empilement piézoélectrique.
- [0066] Les figures 3H à 3O illustrent la formation de l'empilement piézoélectrique 30 sur la membrane 25. L'empilement est formé par des dépôts successifs de couches. Au fur et à mesure de la formation de l'empilement, la déflexion de la membrane 25 se réduit.
- [0067] La [Fig.3H] montre le dépôt d'une première couche conductrice formant une première électrode 31. Il peut par exemple s'agir de molybdène, ou de platine, ou d'un mélange aluminium/cuivre. L'épaisseur de la couche 31 peut être de 200 nm.
- [0068] La [Fig.3I] représente le dépôt d'une couche 33 d'un matériau piézoélectrique, ce dernier pouvant être AlN (nitrure d'aluminium) ou du PZT (Titano Zirconate de Plomb), ou de l'oxyde de zinc (ZnO). L'épaisseur est comprise entre 400 nm et 4 μ m. La couche de matériau piézoélectrique 33 contribue sensiblement à augmenter la rigidité, ce qui diminue la déflexion de la membrane 25.
- [0069] La [Fig.3J] montre le dépôt d'une deuxième couche conductrice 32, de telle sorte que la couche de matériau piézoélectrique 33 s'étend entre la couche conductrice 31 et la couche conductrice 32. La couche conductrice 32 est structurée par gravure pour former une deuxième électrode ([Fig.3K]). Suite à cette étape, on forme une reprise de contacts sur la première couche conductrice 31. Une partie de la couche piézoélectrique 33 est retirée par gravure ([Fig.3L]) de façon à former une ouverture

- permettant la reprise de contact, cette dernière étant effectuée à côté de l'ouverture
- [0070] L'empilement piézoélectrique 30 est complété par le dépôt d'une couche de passivation 34, par exemple SiN, selon une épaisseur de 300 nm ([Fig.3M]). La [Fig.3N] illustre la gravure localisée de la couche de passivation, de façon à permettre le dépôt puis la gravure d'une couche métallique 35 pour former des connexions électriques vers la première électrode 31 et vers la deuxième électrode 32 : cf. [Fig.3O]. La couche métallique 35 permet de former un premier plot de connexion 35₁, électriquement connecté à la première électrode 31, et un deuxième plot de connexion 35₂, électriquement relié à la deuxième électrode 32.
- [0071] La [Fig.4A] représente un mode de réalisation selon lequel on diminue la rigidité de l'empilement piézoélectrique 30, supporté par la membrane 25, en retirant localement une partie de la couche piézoélectrique 33 et de la deuxième électrode 32. La partie de la couche piézoélectrique retirée peut notamment s'étendre à l'aplomb de la cavité 11. Le retrait peut être effectué par gravure. Le retrait maintient la connexion électrique entre la deuxième électrode 32 et le deuxième plot 35₂. L'empilement piézoélectrique peut être virtuellement divisé en une partie centrale 30_c, adjacente de la zone médiane de la cavité 11, et une partie périphérique 30_p, s'étendant entre le deuxième plot 35₂ et la partie centrale 30_c. Le retrait de la couche piézoélectrique 33 intervient dans la partie périphérique 30_p. Le retrait d'une partie de la couche piézoélectrique 33 permet d'ajuster la rigidité de l'ensemble formé par la membrane 25 et l'empilement piézoélectrique 30.
- [0072] La [Fig.4B] montre une configuration similaire à celle représentée sur la [Fig.2D], selon laquelle la cavité 11 comporte plusieurs butées 15. Les butées sont de préférence alignées le long d'une direction parallèle à la face supérieure 10_s. Un tel mode de réalisation convient à la formation de membranes dont le diamètre ou la diagonale sont élevées.
- [0073] La [Fig.4C] montre une configuration similaire à celle représentée sur la [Fig.2E], selon laquelle chaque la cavité 11 comporte plusieurs butées 15. Dans la cavité 11, la hauteur des butées est variable. Les butées sont d'autant moins hautes qu'elles sont disposées à proximité de la zone médiane de la butée. Sur la [Fig.4C], chaque zone médiane a été matérialisée par un axe en tirets mixtes.
- [0074] Le dispositif représenté sur la [Fig.4C] peut être obtenu en réalisant plusieurs gravures successives dans la cavité. Une première gravure est réalisée, comme décrit en lien avec les figures 3B et 3C. La surface d'appui définie suite à la première gravure est une surface d'appui initiale 13₁. La surface d'appui initiale forme les extrémités des butées les plus hautes. La deuxième gravure est réalisée en plusieurs étapes. La deuxième gravure comporte une gravure intermédiaire, jusqu'à un fond intermédiaire, pour former une surface d'appui intermédiaire 13₂. Au moins une surface d'appui in-

termédiaire est définie sur le fond intermédiaire. La deuxième gravure est ensuite finalisée, jusqu'au fond de la cavité, autour de la surface d'appui intermédiaire (ou autour de chaque surface d'appui intermédiaire), et autour de la (ou de chaque) surface d'appui initiale. Suite à la deuxième gravure, la surface d'appui intermédiaire forme une extrémité d'une butée moins haute que la butée s'étendant à partir de la surface d'appui initiale.

- [0075] L'invention pourra être mise en œuvre pour réaliser des capteurs électromécaniques de type pMUT, dont la fréquence de résonance, tout en restant dans le domaine spectral ultrasonore, est inférieure à 1 MHz ou à 300 KHz. Il peut par exemple s'agir de capteurs destinés à la détection d'obstacles, par exemple des capteurs destinés à être embarqués sur des véhicules.
- [0076] L'invention peut être mise en œuvre pour obtenir un capteur de type résonateur électromécanique ou d'autres types de systèmes électromécaniques, par exemple des capteurs de pression.

Revendications

[Revendication 1]

Capteur électromécanique (1), comportant :

- une membrane (25), suspendue sur au moins une cavité (11), ménagée dans un substrat (10), la cavité s'étendant entre la membrane et un fond (14), la distance entre la membrane et le fond formant une profondeur de la cavité (d_2);
- un empilement piézoélectrique (30), porté par la membrane, et comportant une couche (33) d'un matériau piézoélectrique s'étendant entre une première couche conductrice (31) et une deuxième couche conductrice (32);

le capteur étant tel que :

- la membrane est susceptible de vibrer sous l'effet d'une tension alternative, ou d'un courant alternatif, entre la première couche conductrice et la deuxième couche conductrice ;
- et/ou la membrane, sous l'effet d'une vibration, est susceptible de générer une tension alternative, ou un courant alternatif, entre la première couche conductrice et la deuxième couche conductrice ;

le capteur étant caractérisé en ce que :

- la cavité comporte au moins une butée (15), s'étendant à partir du fond de la cavité, vers la membrane, jusqu'à une extrémité (13), l'extrémité étant disposée à une hauteur (h), par rapport au fond, inférieure à la profondeur de la cavité (d_2) ;
- la membrane s'étend selon une épaisseur (ε);
- la hauteur de la butée correspond à la profondeur de la cavité (d_2) diminuée de k fois l'épaisseur de la membrane, où k est un réel compris entre 0.5 et 3 ou entre 0.5 et 2.

[Revendication 2]

Capteur selon la revendication 1, dans lequel la membrane (25) s'étend, en dessus de la cavité (11), selon un diamètre ou une diagonale supérieure à 100 μm .

[Revendication 3]

Capteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans

lequel :

- la cavité comporte plusieurs butées (15);
- chaque butée s'étend, à partir du fond de la cavité (14), vers la membrane, jusqu'à une extrémité, l'extrémité étant disposée à une hauteur, par rapport au fond, inférieure à la profondeur (d_2) de la cavité.

[Revendication 4] Capteur selon la revendication 3, dans lequel au moins deux butées différentes ont deux hauteurs différentes.

[Revendication 5] Capteur selon la revendication 4, dans lequel la hauteur des butées est d'autant plus faible que la butée est proche d'une zone médiane de la cavité.

[Revendication 6] Capteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'empilement piézoélectrique (30) comporte une partie centrale (30_c), à l'aplomb d'une zone médiane de la cavité, et une partie périphérique (30_p), autour de la partie centrale, le capteur étant tel qu'une portion de la partie périphérique ne comporte pas de couche de matériau piézoélectrique.

[Revendication 7] Capteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel plusieurs cavités sont formées sous un même empilement piézoélectrique.

[Revendication 8] Procédé de fabrication d'un capteur électromécanique (1), selon l'une quelconque des revendications précédentes, le procédé comportant les étapes suivantes:

- a) gravure d'une cavité (11) dans un substrat inférieur (10), le substrat inférieur s'étendant entre une face inférieure (10_i) et une face supérieure (10_s), la cavité débouchant sur la face supérieure;
- b) scellement d'un substrat supérieur (20) sur la face supérieure du substrat inférieur, de façon à fermer la cavité (11);
- c) amincissement du substrat supérieur (20), de façon à former la membrane (25) du capteur;
- d) formation d'un empilement piézoélectrique (30) sur la membrane, l'empilement piézoélectrique comportant une couche (33) d'un matériau piézoélectrique s'étendant entre une première couche conductrice (31) et une deuxième couche conductrice (32) ;

le procédé étant caractérisé en ce qu'il comporte, préalablement à l'étape a), une prise en compte d'une épaisseur ;

et en ce que l'étape a) comporte les sous-étapes suivantes :

- a-1) première gravure du substrat inférieur (10), de façon à former une cavité (11), la cavité s'étendant, à partir de la face supérieure (10_s), jusqu'à un premier fond (14₁);
- a-2) définition d'au moins une surface d'appui (13) sur le premier fond ;
- a-3) deuxième gravure du substrat inférieur (10), dans la cavité, autour de la surface d'appui, jusqu'à un deuxième fond (14), formant le fond de la cavité, de façon que suite à la deuxième gravure, la cavité comporte une butée (15), s'étendant à partir du fond de la cavité, vers la membrane, jusqu'à la surface d'appui (13), la surface d'appui formant une extrémité de la butée, l'extrémité étant disposée à une hauteur (h), par rapport au fond, inférieure à la profondeur de la cavité (d₂), la hauteur de la butée correspondant à la profondeur de la cavité (d₂) diminuée de k fois l'épaisseur préalablement prise en compte, où k est un réel compris entre 0.5 et 3 ou entre 0.5 et 2 ;.

et en ce que suite à l'étape c), l'épaisseur de la membrane correspond à la valeur d'épaisseur préalablement prise en compte, de façon que la surface d'appui limite une déflexion de la membrane à l'intérieur de la cavité.

[Revendication 9]

Procédé selon la revendication 8, dans lequel :

- la cavité s'étend, parallèlement à la face supérieure, selon un diamètre ou une diagonale;
- au moins une butée (15) s'étend au niveau de la moitié du diamètre ou de la diagonale.

[Revendication 10]

Procédé selon l'une quelconque des revendications 8 ou 9 dans lequel :

- la cavité s'étend, parallèlement à la face supérieure, selon un diamètre ou une diagonale;
- plusieurs butées (15) s'étendent le long du diamètre ou de la

diagonale.

[Revendication 11] Procédé selon l'une quelconque des revendications 8 à 10, dans lequel :

- la portion d'appui définie lors de la sous-étape a-1), est une portion d'appui initiale (13_1);
- la deuxième gravure comporte :
 - une gravure intermédiaire, jusqu'à un fond intermédiaire ;
 - une définition d'au moins une surface d'appui intermédiaire (13_2) sur le fond intermédiaire ;
 - une gravure de la cavité (11) autour de la surface d'appui intermédiaire et autour de la portion d'appui initiale, jusqu'au fond de la cavité ;
 - de façon que suite à la sous-étape a-3), la surface d'appui intermédiaire s'étend, par rapport au fond, à une hauteur inférieure à celle de la surface d'appui initiale.

[Revendication 12] Procédé selon l'une quelconque des revendications 8 à 11, dans lequel l'étape d) comporte :

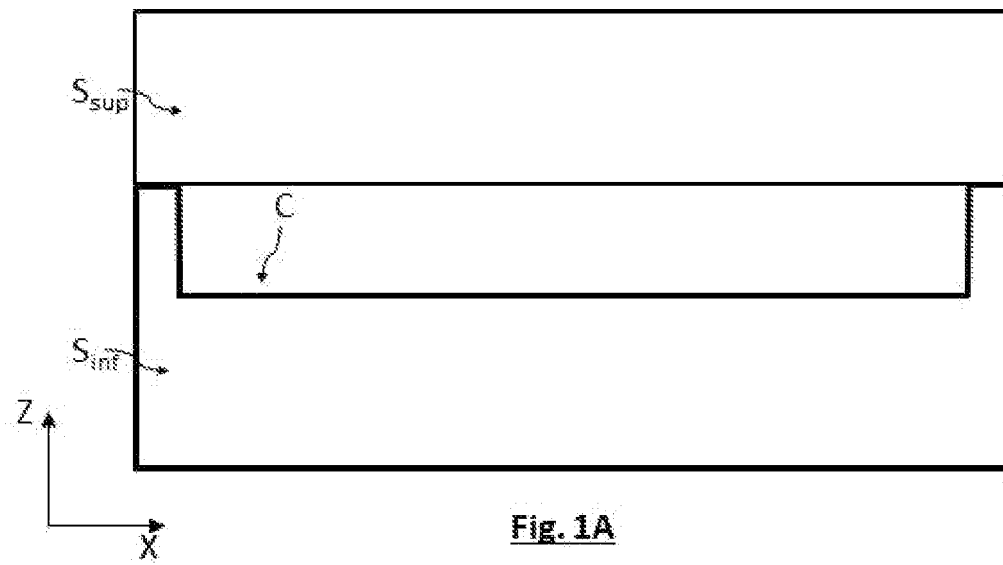
- dépôt de la première couche conductrice (31) sur la membrane (25), de façon à former une première électrode ;
- dépôt de la couche du matériau piézoélectrique (33) sur la première couche conductrice ;
- dépôt d'une deuxième couche conductrice (32) sur la couche de matériau piézoélectrique (33) , de façon à former une deuxième électrode.

[Revendication 13] Procédé selon la revendication 12, dans lequel l'étape d) comporte également :

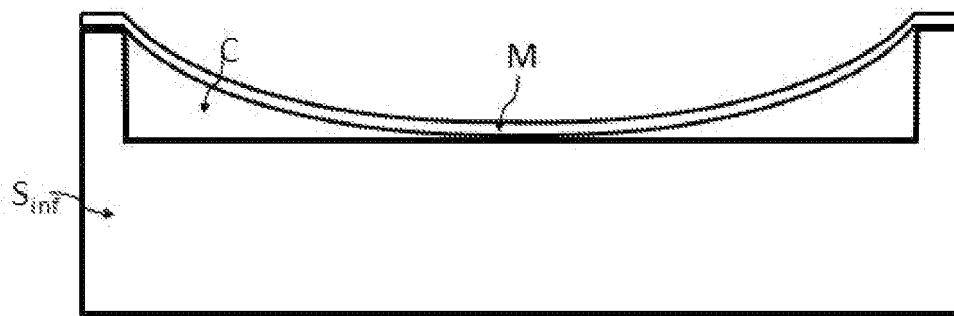
- formation d'un premier contact électrique (35_1), à travers la couche de matériau piézoélectrique, pour polariser la première électrode ;
- formation d'un deuxième contact électrique (35_2) pour polariser la deuxième électrode.

- [Revendication 14] Procédé selon la revendication 13, comportant un retrait d'une partie de la deuxième électrode (32) et du matériau piézoélectrique (33), à l'aplomb de la cavité, de façon à diminuer la rigidité de la membrane, le retrait étant réalisé de façon à maintenir une connexion électrique entre la deuxième électrode et le deuxième contact électrique (35₂).
- [Revendication 15] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel la membrane s'étend, sur une cavité, selon un diamètre ou une diagonale supérieure à 100 µm.

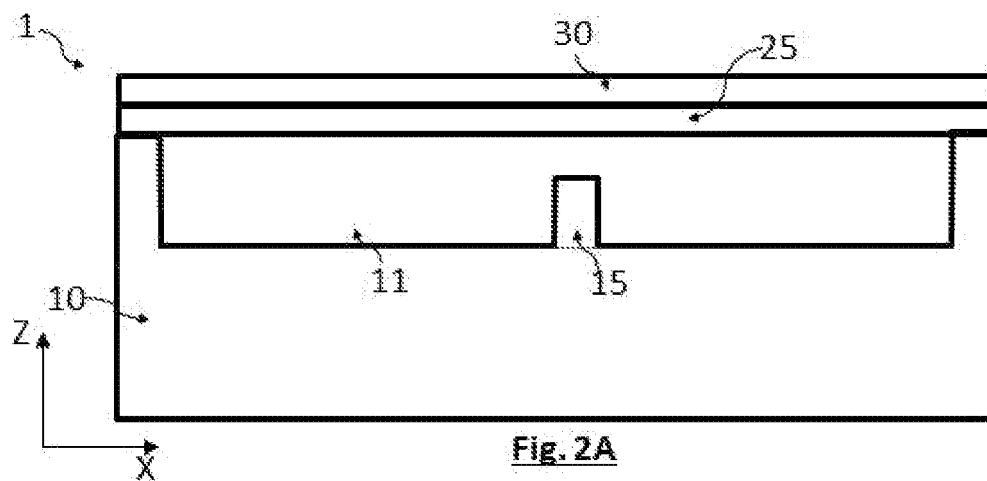
[Fig. 1A]



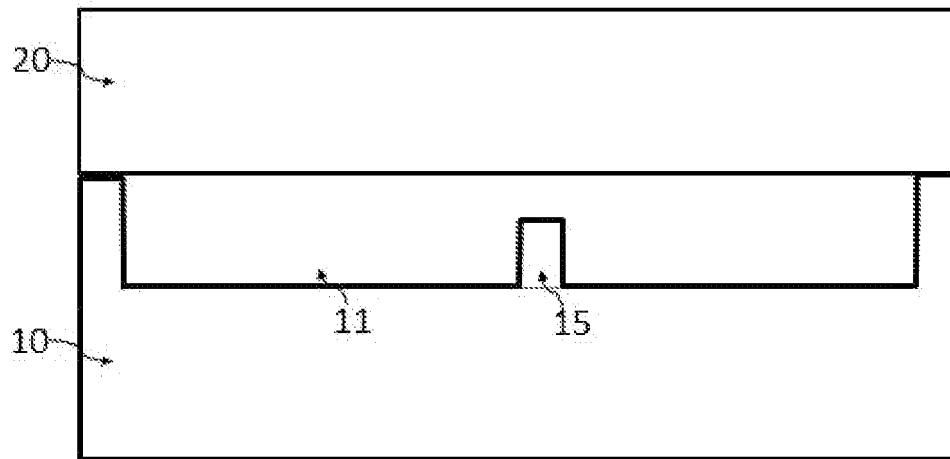
[Fig. 1B]

Fig. 1B

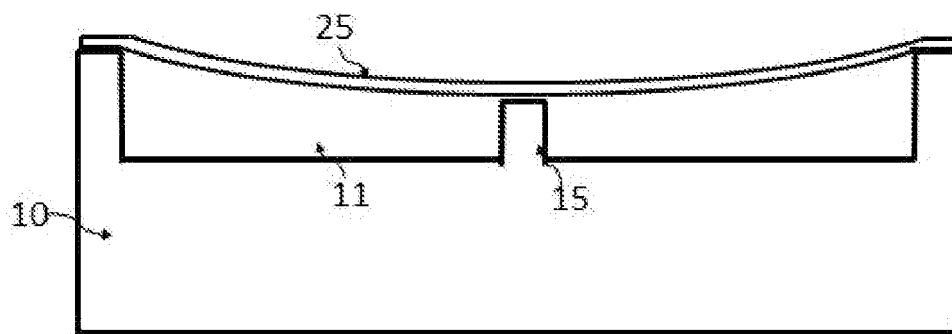
[Fig. 2A]

Fig. 2A

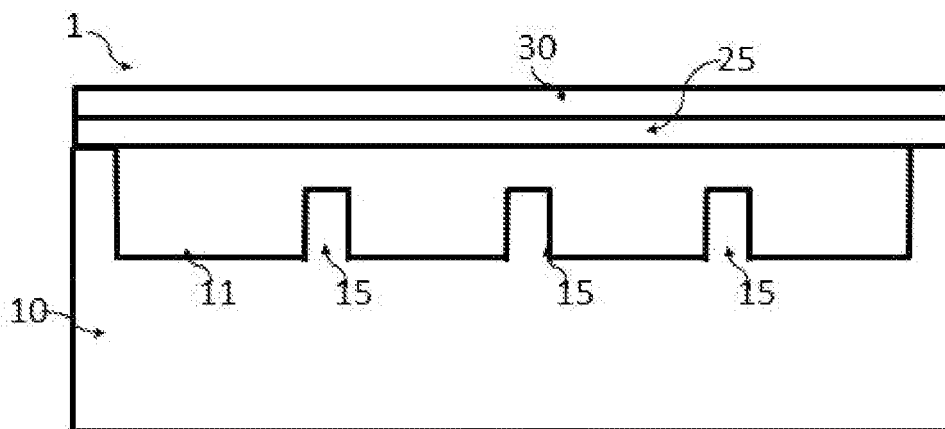
[Fig. 2B]

**Fig. 2B**

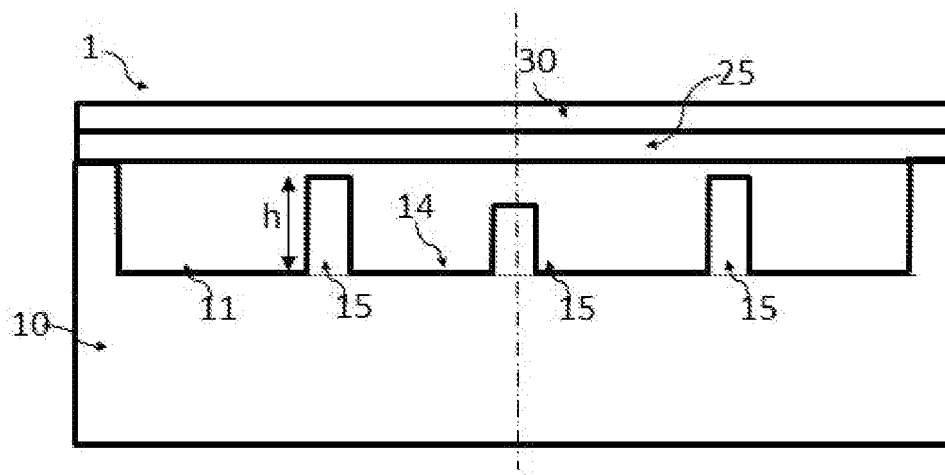
[Fig. 2C]

**Fig. 2C**

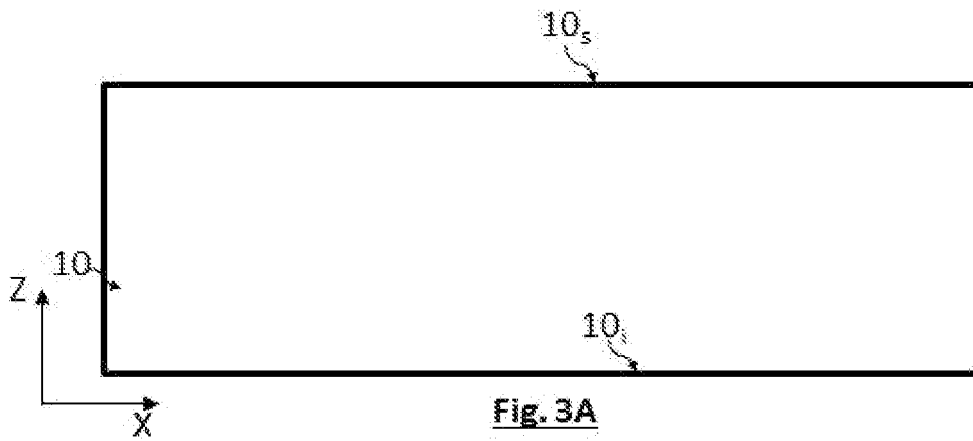
[Fig. 2D]

**Fig. 2D**

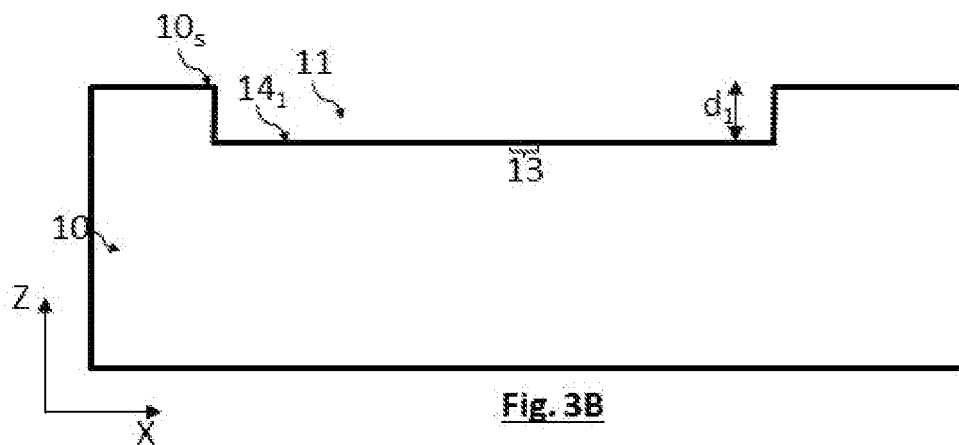
[Fig. 2E]

**Fig. 2E**

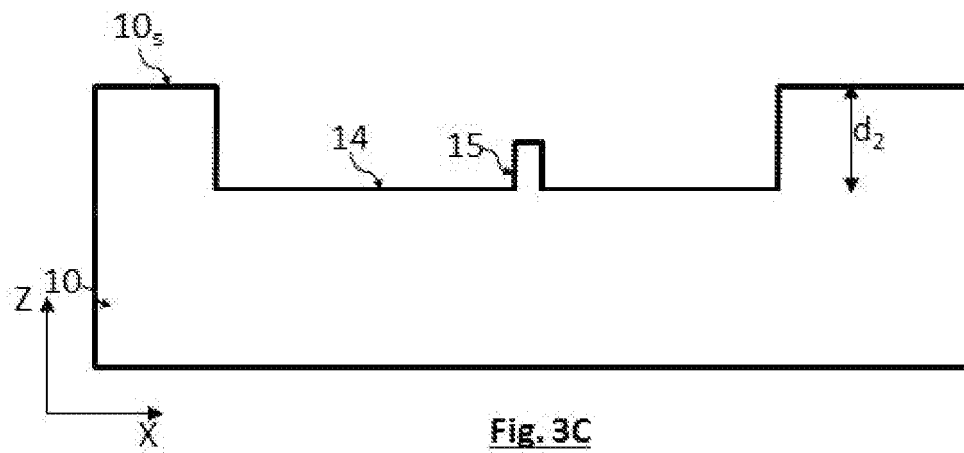
[Fig. 3A]

**Fig. 3A**

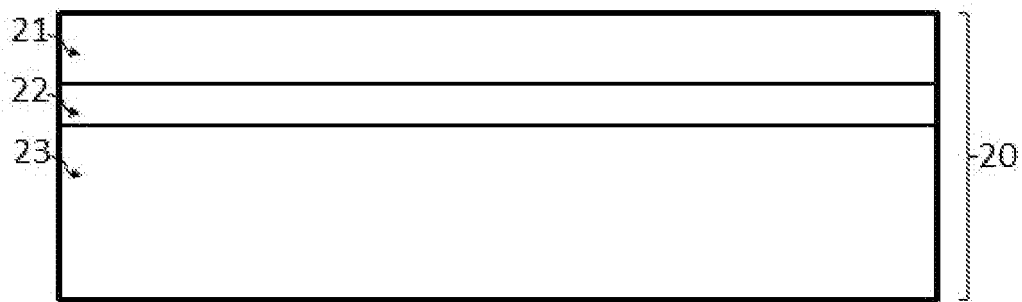
[Fig. 3B]

**Fig. 3B**

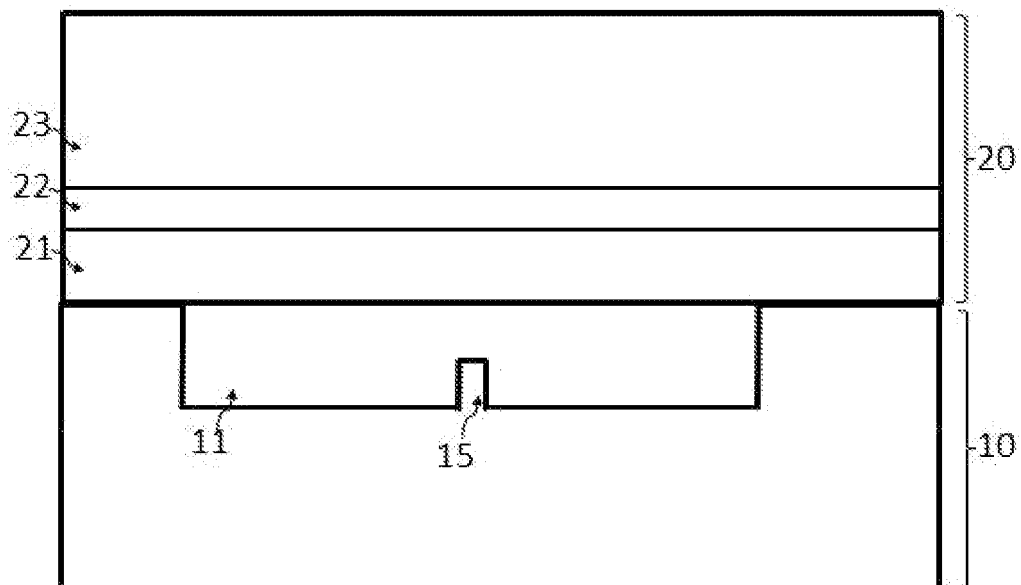
[Fig. 3C]

**Fig. 3C**

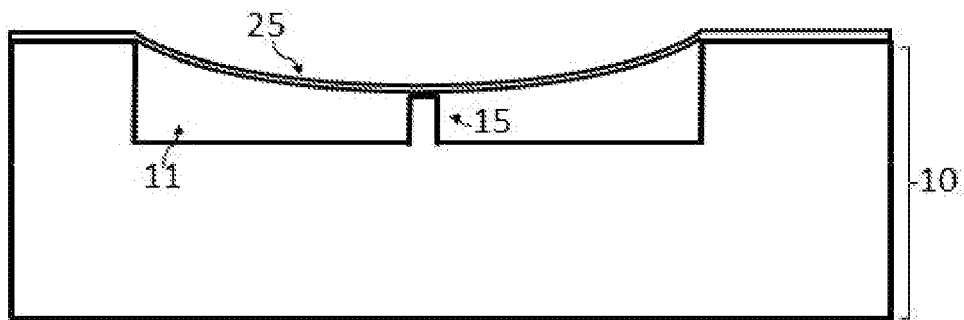
[Fig. 3D]

**Fig. 3D**

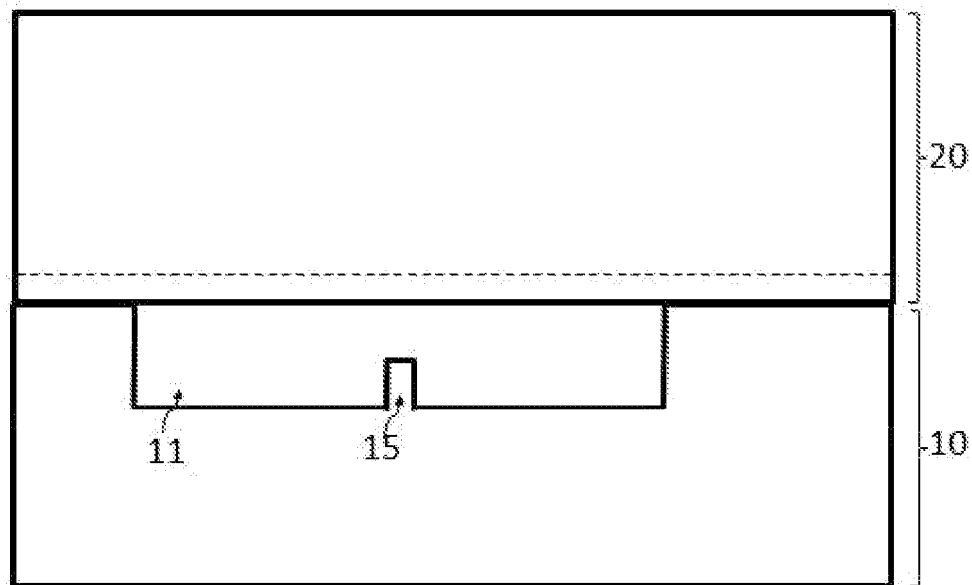
[Fig. 3E]

**Fig. 3E**

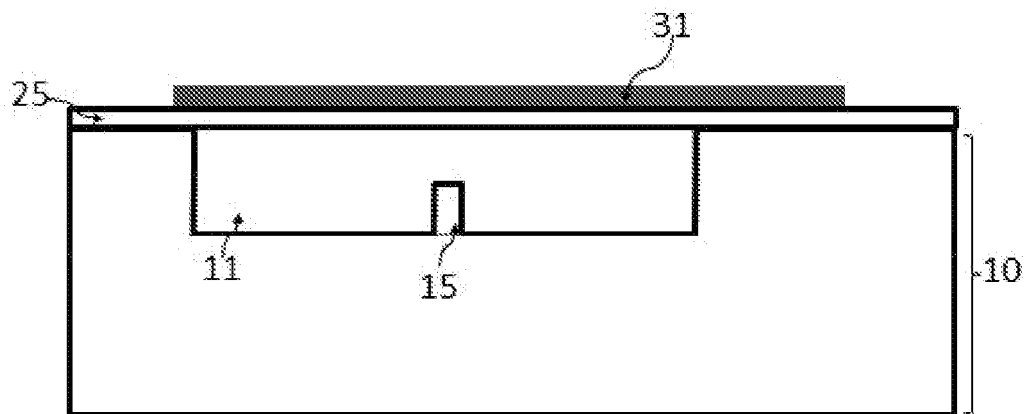
[Fig. 3F]

**Fig. 3F**

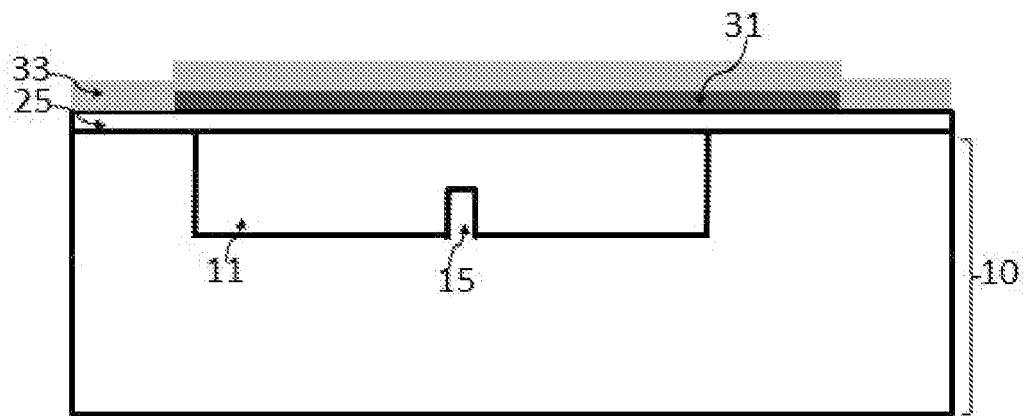
[Fig. 3G]

**Fig. 3G**

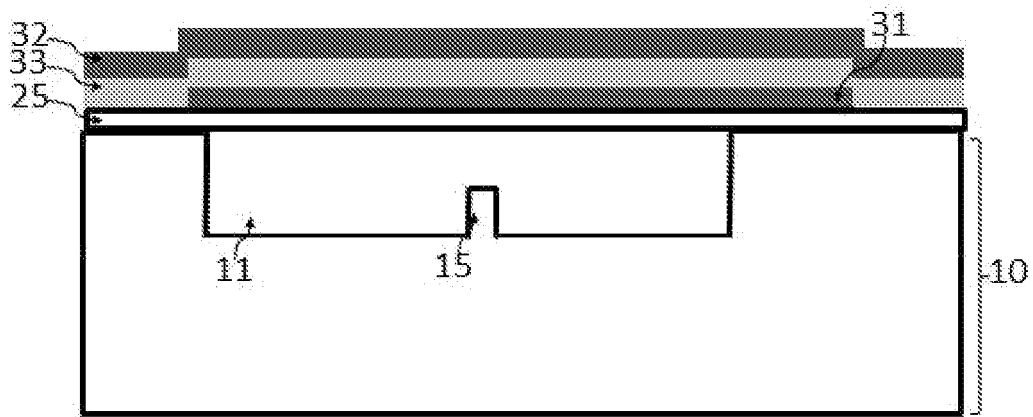
[Fig. 3H]

**Fig. 3H**

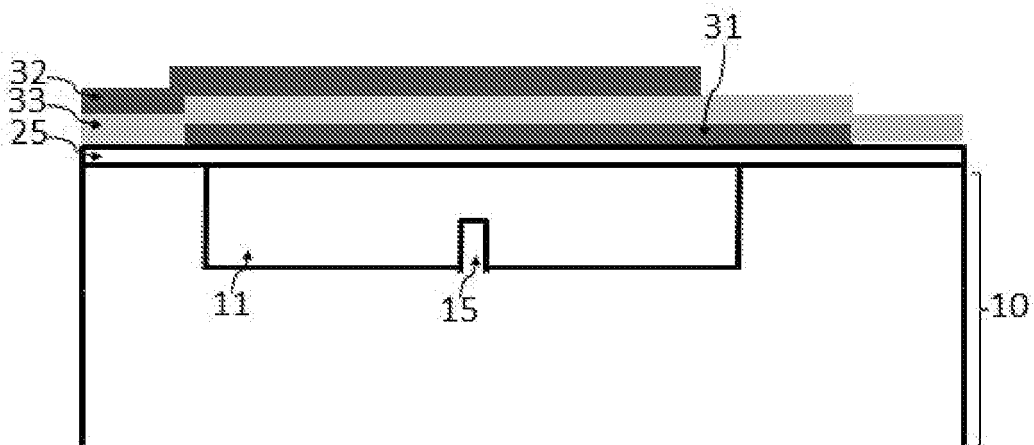
[Fig. 3I]

**Fig. 3I**

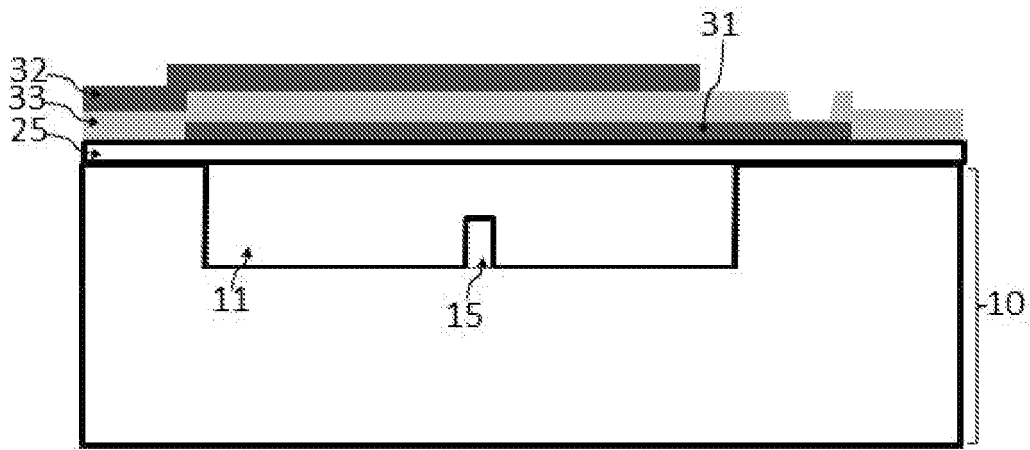
[Fig. 3J]

**Fig. 3J**

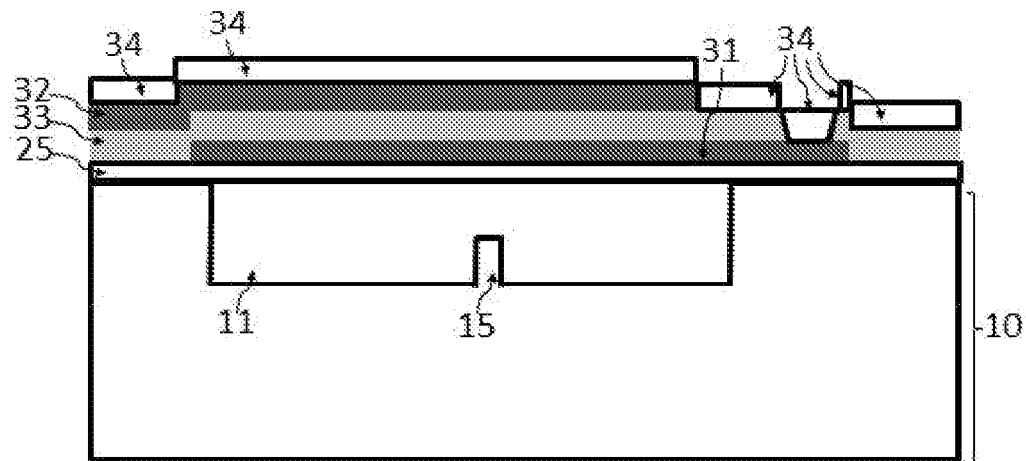
[Fig. 3K]

**Fig. 3K**

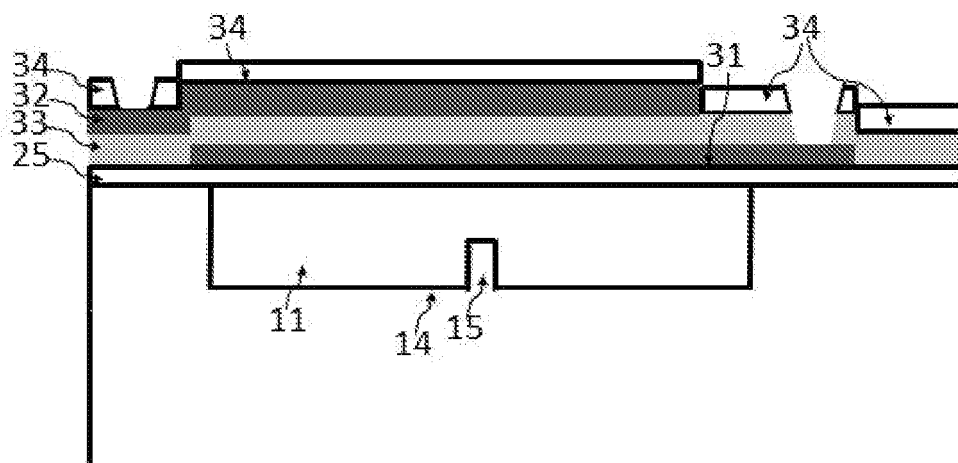
[Fig. 3L]

**Fig. 3L**

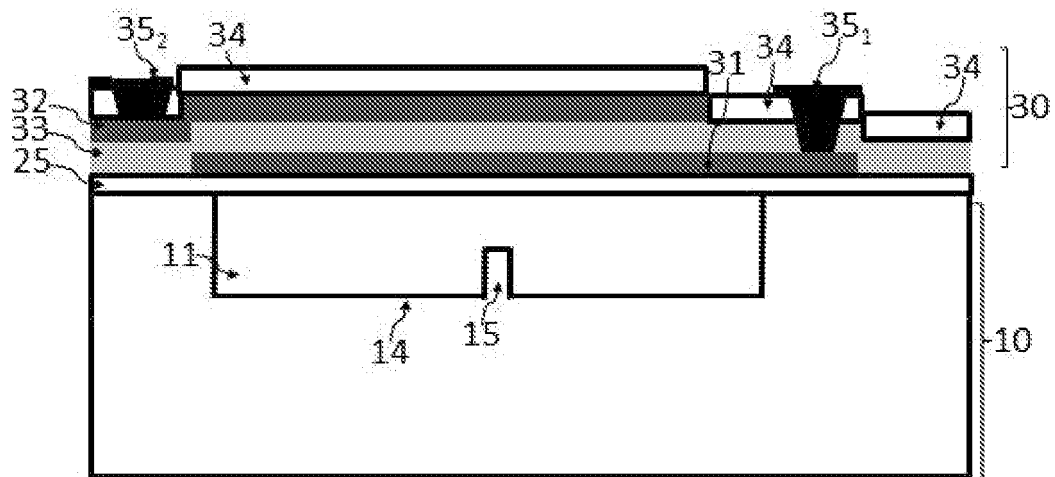
[Fig. 3M]

**Fig. 3M**

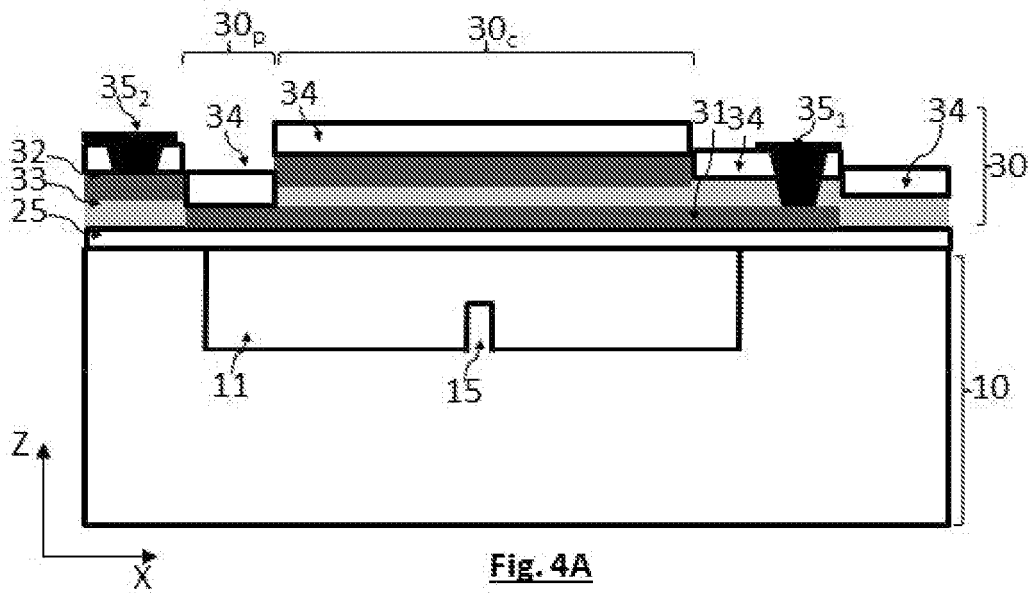
[Fig. 3N]

**Fig. 3N**

[Fig. 30]

**Fig. 30**

[Fig. 4A]

**Fig. 4A**

[Fig. 4B]

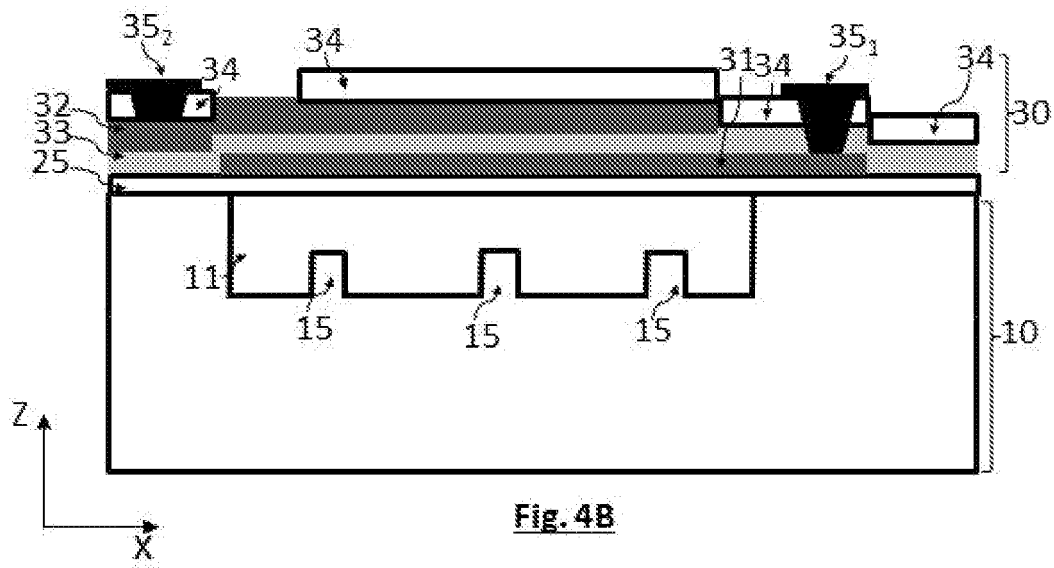


Fig. 4B

[Fig. 4C]

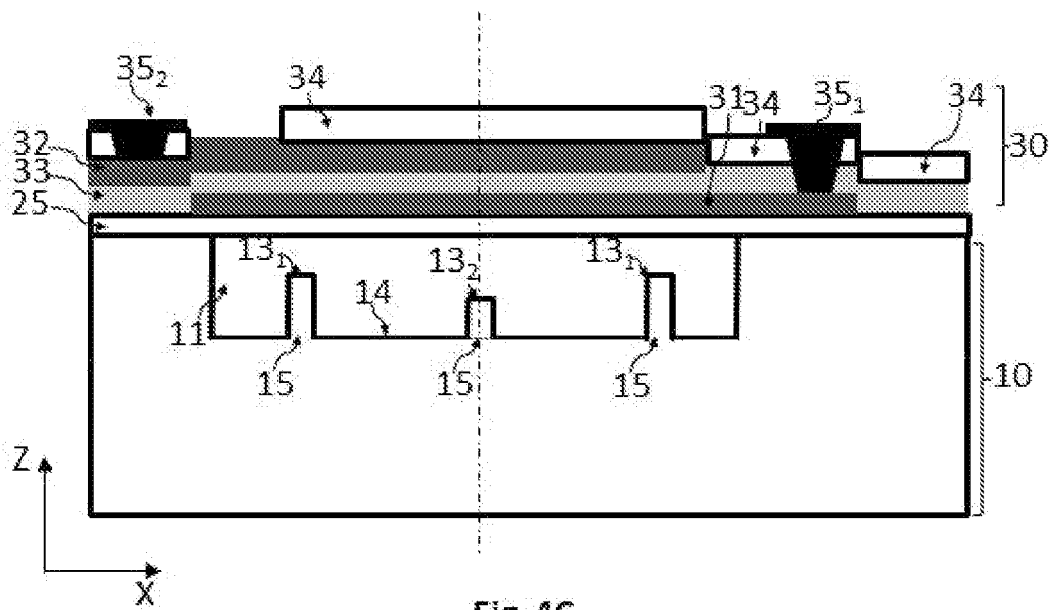


Fig. 4C

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 902990
FR 2114499

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	US 2015/145374 A1 (XU JINGHUI [SG] ET AL) 28 mai 2015 (2015-05-28)	1-3, 6, 8-15 4, 5, 7	B81B3/00 B81C1/00
Y	* alinéas [0032], [0033], [0035], [0041], [0043], [0070], [0071], [0084] - [0089], [0110] - [0113], [0115], [0119] * * figures 1A, 2A, 2B, 5A, 5B, 5C, 5D, 5E, 5F, 6B * -----		
Y	FR 3 010 272 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 6 mars 2015 (2015-03-06) * page 10, lignes 24-25 * -----		
Y	US 10 632 500 B2 (INVENSENSE INC [US]) 28 avril 2020 (2020-04-28) * figures 1, 2 * -----	7	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			B06B G01H G01V H01L
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
14 juillet 2022		Mirkovic, Olinka	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE **RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2114499 FA 902990**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
 Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **14-07-2022**
 Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2015145374 A1	28-05-2015	SG 10201407632U A	29-06-2015
		US 2015145374 A1	28-05-2015

FR 3010272 A1	06-03-2015	CN 105519134 A	20-04-2016
		EP 3042509 A1	13-07-2016
		FR 3010272 A1	06-03-2015
		US 2016205478 A1	14-07-2016
		WO 2015032855 A1	12-03-2015

US 10632500 B2	28-04-2020	US 2017326594 A1	16-11-2017
		WO 2017196680 A1	16-11-2017
