



(12) **DEMANDE DE BREVET CANADIEN
CANADIAN PATENT APPLICATION**

(13) **A1**

(86) Date de dépôt PCT/PCT Filing Date: 2017/07/06
 (87) Date publication PCT/PCT Publication Date: 2018/02/01
 (85) Entrée phase nationale/National Entry: 2019/01/10
 (86) N° demande PCT/PCT Application No.: FR 2017/051850
 (87) N° publication PCT/PCT Publication No.: 2018/020096
 (30) Priorité/Priority: 2016/07/27 (FR16 01154)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *G01N 29/02* (2006.01)
 (71) Demandeur/Applicant:
 OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE RECHERCHES
 AEROSPATIALES, FR
 (72) Inventeurs/Inventors:
 Aoust, Guillaume, FR;
 Bourgeteau, Beatrice, FR;
 Levy, Raphael, FR;
 Le Traon, Olivier, FR;
 Janiaud, Denis, FR...
 (74) Agent: NORTON ROSE FULBRIGHT CANADA
 LLP/S.E.N.C.R.L., S.R.L.

(54) Titre : RESONATEUR MECANIQUE OPTIMISE POUR FONCTIONNER DANS UN FLUIDE
 (54) Title: MECHANICAL RESONATOR OPTIMISED TO OPERATE IN A FLUID

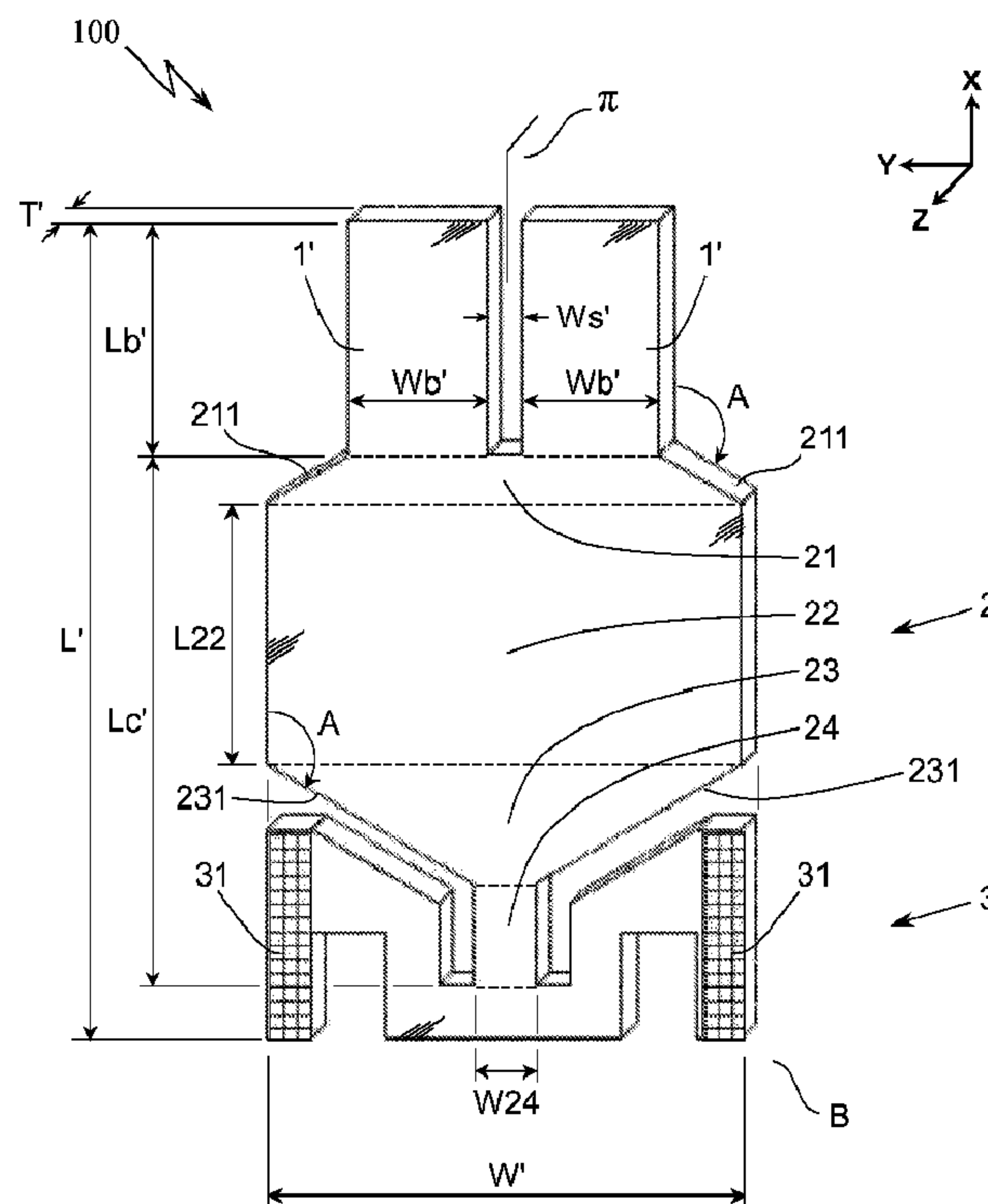


FIG. 3A

(57) **Abrégé/Abstract:**

Le résonateur selon l'invention comporte une poutre dont la largeur entre chants (W_b') est voisine de $\zeta/2$. La variation de pression sur un chant est alors en opposition de phase avec celle sur l'autre chant. Le couplage acoustique avec une onde incidente ayant

(57) **Abrégé(suite)/Abstract(continued):**

cette longueur d'onde est ainsi amélioré. Le rapport entre la largeur entre chants et la hauteur de la poutre est choisi pour que seul le mode fondamental de vibration de flexion de la poutre soit présent. L'invention s'applique aux poutres d'un diapason encastrées dans une base commune massive optimisée pour confiner l'énergie dans le diapason en évitant les pertes d'énergie dans le support. Enfin, le diapason est avantageusement combiné à un moyen de confinement d'énergie acoustique comportant un écran réfléchissant rigide.

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international(10) Numéro de publication internationale
WO 2018/020096 A1(43) Date de la publication internationale
01 février 2018 (01.02.2018)(51) Classification internationale des brevets :
G01N 29/02 (2006.01)des Caves, 91430 VAUHALLAN (FR). JANIAUD, Denis
; 7 allée Gauguin, 91940 LES ULIS (FR).(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2017/051850(74) Mandataire : CABINET PLASSERAUD ; 66 rue de la
Chaussée d'Antin, 75440 PARIS CEDEX 09 (FR).(22) Date de dépôt international :
06 juillet 2017 (06.07.2017)(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO,
AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA,
CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ,
EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR,
HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR,
KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG,
MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM,
PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC,
SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR,
TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
16 01154 27 juillet 2016 (27.07.2016) FR(71) Déposant : OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE
RECHERCHES AÉROSPATIALES [FR/FR] ; Chemin
de la Humière, 91120 PALAISEAU (FR).(72) Inventeurs : AOUST, Guillaume ; Bonneval, 43300
SAINT ARCONS D'ALLIER (FR). BOURGETEAU,
Béatrice ; 76 boulevard Rodin, 92130 ISSY LES MOULI-
NEAUX (FR). LEVY, Raphaël ; 48 rue Raymond Losse-
rand, 75014 PARIS (FR). LE TRAON, Olivier ; 16 Chemin(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM,
KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG,
ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM),
européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES,
FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK,

(54) Title: MECHANICAL RESONATOR OPTIMISED TO OPERATE IN A FLUID

(54) Titre : RÉSONATEUR MÉCANIQUE OPTIMISÉ POUR FONCTIONNER DANS UN FLUIDE

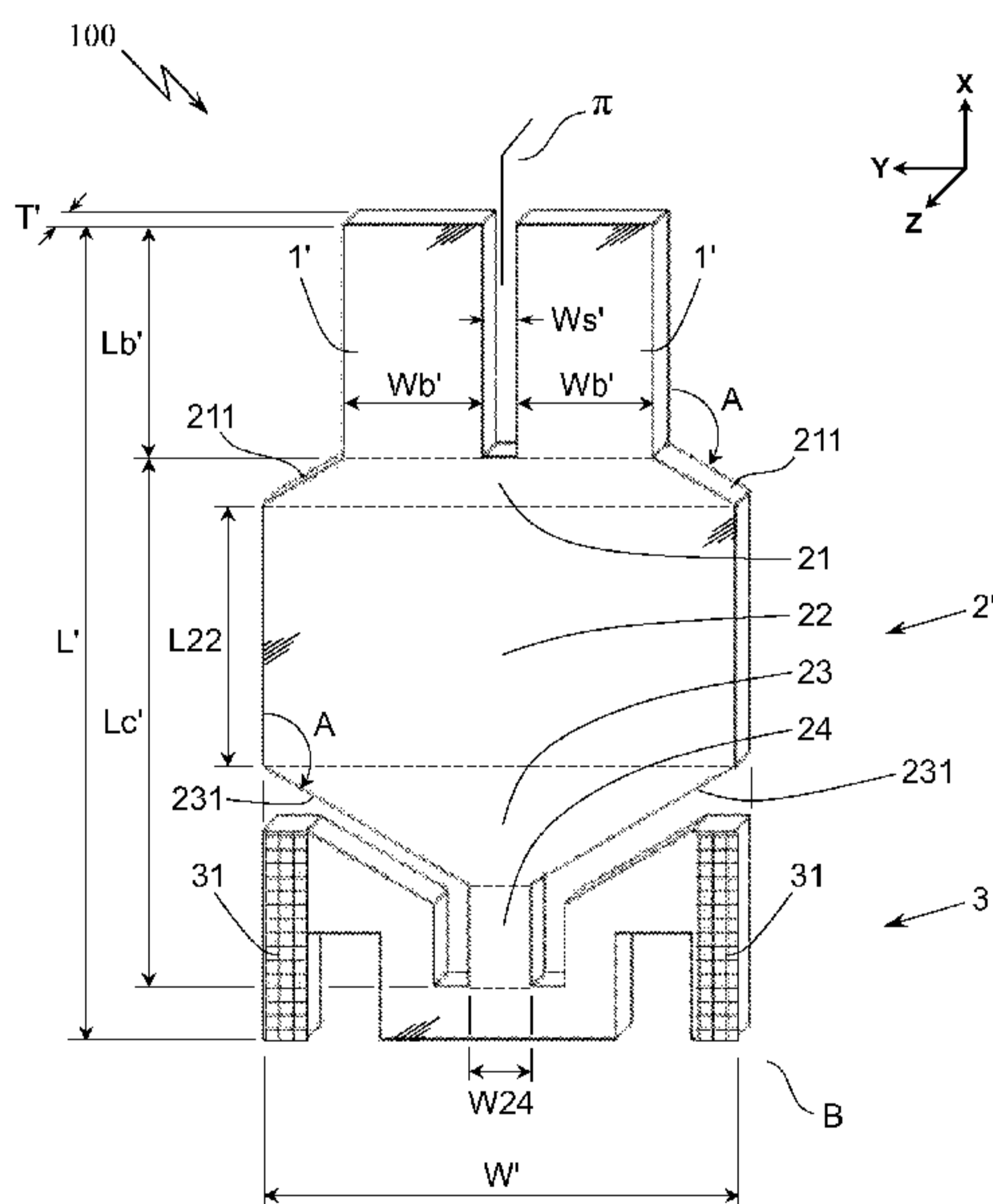


FIG. 3A

(57) Abstract: The invention relates to a resonator which includes a prong in which the width between edges (Wb') is close to $\lambda/2$. The pressure variation on one edge is then in phase opposition with that on the other edge. Acoustic coupling with an incident wave having said wavelength is thus improved. The ratio between the width between edges and the height of the prong is chosen so that only the fundamental mode for bending oscillation of the prong is present. The invention relates to the prongs of a tuning fork embedded in a solid shared base optimised to contain the energy in the tuning fork while avoiding energy losses in the mounting. Finally, the tuning fork is advantageously combined with a means for containing acoustic energy comprising a rigid reflecting screen.(57) Abrégé : Le résonateur selon l'invention comporte une poutre dont la largeur entre chants (Wb') est voisine de $\lambda/2$. La variation de pression sur un chant est alors en opposition de phase avec celle sur l'autre chant. Le couplage acoustique avec une onde incidente ayant cette longueur d'onde est ainsi amélioré. Le rapport entre la largeur entre chants et la hauteur de la poutre est choisi pour que seul le mode fondamental de vibration de flexion de la poutre soit présent. L'invention s'applique aux poutres d'un diapason encastrées dans une base commune optimisée pour confiner l'énergie dans le diapason en évitant les pertes d'énergie dans le support. Enfin, le diapason est avantageusement combiné à un moyen de confinement d'énergie acoustique comportant un écran réfléchissant rigide.

WO 2018/020096 A1 

MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI
(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML,
MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

RÉSONATEUR MECANIQUE OPTIMISE POUR FONCTIONNER DANS UN FLUIDE

Le domaine technique de l'invention est celui des résonateurs mécaniques destinés à être intégrés dans des instruments de métrologie, en particulier les instruments
5 détectant la présence d'éléments chimiques dans l'atmosphère et en mesurant la concentration.

Le résonateur constitue l'élément sensible de l'instrument. La fréquence, la stabilité et la qualité de la
10 résonance sont liées aux dimensions, à la géométrie, au matériau constitutif et à l'environnement du résonateur. La résonance est entretenue par des moyens externes.

Le facteur de qualité d'un résonateur est défini comme étant le rapport entre l'énergie stockée dans le résonateur,
15 sous forme d'énergie cinétique et potentielle de déformation, et l'énergie perdue au cours d'un cycle d'oscillation.

Un des résonateurs mécaniques les plus connus est le diapason en quartz mis en œuvre dans l'industrie horlogère. La résonance est maintenue par un circuit électronique
20 accordé, mais c'est la qualité de la résonance mécanique des deux poutres du diapason qui assure la stabilité et la pureté de la fréquence de résonance.

Ce résonateur étant encapsulé dans un boîtier où le vide a été réalisé, l'énergie se perd essentiellement dans le
25 support de fixation.

La figure 1 illustre un exemple de résonateur horloger
10 réalisé dans une plaque de quartz d'épaisseur $T = 0,2$ mm. Le diapason est formé de deux poutres parallèles parallélépipédiques 1 identiques solidaires à une de leurs
30 extrémités d'une partie commune 2 fixée au support. Le diapason est ainsi symétrique par rapport au plan médian π . Les dimensions des poutres dans le plan de la plaque sont : longueur $L_b = 3,8$ mm et largeur $W_b = 0,6$ mm.

Pour faciliter l'usinage, la largeur W_s de la fente
35 séparant les poutres est égale à $0,2$ mm, c'est-à-dire égale à l'épaisseur T de la plaque.

L'élancement d'une poutre est défini comme étant le rapport entre sa longueur L_b et sa largeur W_b . Ainsi, dans l'exemple présenté, l'élancement vaut environ 6,3.

A la fréquence de résonance mécanique du diapason horloger, qui est de 32,768 kHz, les deux poutres vibrent en opposition de phase en flexion dans le plan de la plaque. L'élancement est suffisamment grand pour que les contraintes mécaniques soient essentiellement des contraintes alternatives d'extension et de compression réparties sur la longueur des poutres, mais qu'elles soient peu présentes dans la partie commune où elles s'atténuent rapidement, ce qui permet de limiter les pertes d'énergie lorsque la zone de fixation à l'embase est éloignée de la zone d'encastrement des poutres. Le facteur de qualité d'un tel résonateur est ainsi typiquement de l'ordre de 80 000.

Un circuit électronique externe accordé maintient la résonance au moyen d'électrodes disposées de façon appropriée et connue sur les poutres.

La maîtrise de réalisation et le bas coût de production de ces résonateurs incite à vouloir les utiliser dans des domaines techniques autres que celui de l'horlogerie, par exemple celui de la métrologie.

Des résonateurs de ce type sont utilisés dans des applications de mesure de grandeurs physiques, les déformations des poutres, induites par exemple par une accélération ou une rotation, sont détectées par des électrodes qui, outre leur fonction d'excitation d'un mode de résonance dit mode pilote, peuvent avoir une fonction de détection d'un mode de résonance, dit mode détecteur, modifié par la variation de la grandeur physique considérée (FR2954489).

Ces résonateurs sont aussi utilisés en présence d'un fluide, généralement un gaz ou un mélange de gaz comme l'atmosphère terrestre par exemple.

La présence d'un fluide modifie les pertes d'énergie subies par le résonateur. En plus des pertes dans le support de fixation, apparaissent des pertes liées au frottement

visqueux des poutres avec le fluide et un couplage acoustique lié aux variations de pression du fluide engendrées par le mouvement des poutres.

Dans l'état de l'art de ce domaine, on peut citer l'utilisation de diapasons horlogers pour la technique de mesure dite Quartz Enhanced Photoacoustic Spectroscopy (QEPAS) introduite dans l'article intitulé "Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy", A. A. Kosterev & al, OPTICS LETTERS / Vol. 27, N° 21 / November 1, 2002 ».

L'onde acoustique est le moyen externe qui entretient la résonance du diapason. L'onde se propage à une vitesse constante c dans un fluide donné si la température et la pression P sont constantes. Dans l'atmosphère terrestre, dans les conditions normales de pression et de température, la vitesse du son est d'environ 340 m.s^{-1} .

Enfin, la longueur d'onde λ du son est liée à sa fréquence f et à la vitesse de propagation c par la relation suivante :

$$\lambda=c/f \quad (\text{R})$$

Les auteurs de l'article soulignent que le diapason horloger est très facile à mettre en œuvre (approvisionnement, coût), mais que sa conception n'est probablement pas optimisée vis-à-vis de la détection d'une onde photo acoustique. Ils suggèrent qu'un résonateur spécialement conçu pour cet usage devrait permettre d'améliorer la sensibilité du dispositif, mais sans donner plus d'indication (paragraphe central de la dernière colonne de l'article).

Comme l'essentiel des pertes d'énergie d'un tel résonateur est égal à la somme des pertes dans le support, des pertes dues aux frottements visqueux et des pertes dues au couplage acoustique, il est logique de minimiser chacune de ces pertes.

L'invention a pour but de présenter un résonateur dans lequel les pertes dues aux frottements visqueux et les pertes

dans le support sont minimisées et dans lequel les pertes acoustiques sont au contraire favorisées et d'adjoindre à ce résonateur un moyen apte à lui restituer ses pertes acoustiques, l'ensemble constituant un dispositif optimisé
5 ayant de faibles pertes, y compris acoustiques, donc ayant un facteur de qualité élevé.

L'invention porte sur un résonateur comportant une poutre, de longueur L_b et de largeur W_b , réalisée dans une plaque plane d'épaisseur T solidaire à l'une et/ou l'autre de
10 ses extrémités d'une partie massive fixée à un support.

Cette poutre a un mode résonnant en flexion dans le plan de la plaque à une fréquence f . Ce mode résonnant est excité en présence d'une onde acoustique provenant d'une source d'énergie extérieure, par exemple d'un faisceau laser modulé
15 à la fréquence f partiellement absorbé en traversant le fluide comme dans l'article précité. A proximité du faisceau, un transfert d'énergie du laser vers le fluide s'effectue à la fréquence f de modulation du laser, créant ainsi une onde acoustique de longueur d'onde λ .

20 Il est connu que, dans la relation (R), la vitesse c varie peu en fonction de la fréquence f de l'onde acoustique et de la pression P du fluide (pour des pressions supérieures à 10 Pa). De même, la vitesse c varie relativement peu en fonction de la température pour les températures
25 habituellement rencontrées, c'est-à-dire entre -10°C et $+40^\circ\text{C}$: c évolue comme la racine carrée de la température absolue dans l'hypothèse d'un gaz parfait.

Il est donc possible de concevoir un résonateur type ayant une grande sensibilité dans de nombreuses conditions
30 d'utilisation tout en ayant des dimensions, une géométrie et un matériau constitutif définis.

Ainsi les résonateurs conformes à la présente invention sont des résonateurs mécaniques spécialement conçus pour favoriser le couplage avec une onde acoustique incidente et
35 pour être intégrés dans des instruments de métrologie, en particulier les instruments mesurant la présence d'éléments

chimiques absorbants dans un fluide qui peut être l'atmosphère terrestre.

Quand le mode résonnant est excité, la présence du résonateur perturbe relativement peu l'onde acoustique qui se propage dans tout l'espace environnant le résonateur. De ce fait, l'onde acoustique interagit non seulement sur la face de la poutre tournée vers la source d'énergie ou chant intérieur de la poutre, mais également sur la face opposée ou chant extérieur de la poutre.

10 Dans le cadre de la présente description, on entend par chant une face d'épaisseur du résonateur, qui est perpendiculaire au plan de la plaque, c'est-à-dire qui s'étend dans le sens de l'épaisseur de la plaque pour l'une de ses dimensions de face.

15 Si la source d'énergie est dans le plan de la plaque, mais éloignée de la poutre sur un axe coupant perpendiculairement sa longueur L_b , l'onde acoustique est considérée comme plane lorsqu'elle agit sur les chants de la poutre. Si la distance W_b entre les deux chants de la poutre est égale à $\lambda/2$, la variation de pression sur le chant intérieur de la poutre sera en opposition de phase avec la variation de pression sur le chant extérieur de la poutre, induisant une synergie des efforts exercés par l'onde acoustique sur la poutre. La nature périodique de l'onde acoustique conduit à des valeurs optimisées théoriques de $\lambda/2 + n.\lambda$, n étant un nombre entier positif ou nul.

Cette condition sur la largeur W_b de la poutre est nécessaire pour obtenir un résonateur selon l'invention.

30 Si la source d'énergie n'est pas en champ lointain, l'écart de phase entre les variations de pression sur les chants de la poutre est variable autour de Π . Cela conduit à définir une fourchette de valeurs de la largeur W_b comprise entre $\lambda/4 + n\lambda$ et $3\lambda/4 + n\lambda$, n étant un entier positif ou nul, dans laquelle la synergie des efforts exercés par l'onde acoustique sur les chants de la poutre est moindre mais existe encore.

Un résonateur selon l'invention peut présenter des perfectionnements pour améliorer ses autres performances.

Ainsi, selon un mode de réalisation, la longueur de la poutre est telle que seul le mode fondamental de résonance en flexion soit possible ce qui revient à limiter son élancement.

Pour une poutre encastree à ses deux extrémités, l'élancement est compris entre 2 et 5, pour une poutre encastree à l'une de ses extrémités l'élancement est compris entre 1,2 et 3,6.

La condition d'élancement ne dépend pas des dimensions absolues des poutres, c'est-à-dire que cette condition est valable quel que soit Lb . En revanche, la condition d'élancement dépend du matériau constitutif de la poutre et du fluide l'environnant.

Une telle conformation de la poutre limite les pertes d'énergie dues aux frottements visqueux des poutres avec le fluide.

De préférence, un résonateur selon l'invention sera un diapason comportant deux poutres adjacentes parallèles encastrees à une de leurs extrémités dans une partie commune. Le diapason, de façon connue, permet un meilleur confinement de l'énergie en limitant les pertes d'énergie dans le support.

Si dans un diapason horloger comportant deux poutres ayant un élancement d'environ 6,3 les contraintes sont essentiellement des contraintes alternatives d'extension et de compression réparties sur la longueur des poutres et peu présentes au niveau de l'encastrement dans la partie commune où elles s'atténuent rapidement, il n'en est pas de même lorsque le diapason comporte des poutres fonctionnant dans un fluide comme de l'air et ayant un élancement de l'ordre de 2,3.

A la fréquence de résonance mécanique du diapason, les deux poutres vibrent en opposition de phase en flexion dans le plan de la plaque, mais du fait de leur faible élancement, les contraintes mécaniques sont des contraintes alternatives

d'extension/compression et de cisaillement au niveau de l'encastrement dans la partie commune.

Les modifications des contraintes liées à l'élançement réduit des poutres des résonateurs selon l'invention
5 conduisent à définir une conformation particulière de la partie commune permettant de limiter les pertes dans le support.

Cette partie commune, massive, a la forme d'un parallélépipède rectangle dont la longueur est supérieure au
10 double de la largeur d'une poutre et la hauteur supérieure à la longueur d'une poutre. Par massive, il faut comprendre pesante et non creuse. De part et d'autre de ce parallélépipède sont disposés deux trapèzes isocèles dont les grandes bases ont une longueur égale à la longueur de la
15 partie commune. La petite base d'un des deux trapèzes isocèles supporte les poutres, les chants externes des poutres du diapason coïncidant avec les extrémités de cette base. La petite base de l'autre trapèze isocèle supporte l'élément de liaison intermédiaire reliant le résonateur à
20 son support. La longueur de cette seconde petite base est très inférieure à la longueur du parallélépipède et de l'ordre de la moitié ou du tiers de la largeur d'une poutre, la surface de la partie commune étant voisine de trois fois la surface des deux poutres. En conséquence, la masse de la
25 partie commune est voisine de trois fois la masse des deux poutres, c'est-à-dire comprise entre 2 fois et 4 fois, ou entre 2,5 et 3,5 fois, la masse des deux poutres.

Les pertes d'énergie vers le support sont ainsi réduites par rapport à celles d'un résonateur horloger.

30 Dans le fonctionnement envisagé dans l'invention, le résonateur optimisé est excité par une source d'énergie extérieure. Les électrodes n'ont donc qu'une fonction de détection.

Comme déjà décrit, l'élançement réduit des poutres des
35 résonateurs selon l'invention induit, outre les contraintes de flexion dans les poutres, des contraintes de cisaillement dans la zone d'encastrement sur la partie commune.

La conformation particulière des électrodes est adaptée pour améliorer la détection, par effet piézoélectrique, des vibrations du résonateur.

Les électrodes ont deux polarités et couvrent, sous forme de plages conductrices, la totalité de la surface totale des deux poutres et de la partie commune hormis les zones d'isolation inter électrodes. De préférence, les zones d'isolation inter électrodes occupent moins de 20% de la surface totale des faces de chaque poutre et de la partie commune qui sont parallèles au plan de la plaque.

La conformation des électrodes est caractéristique du fait qu'elle concerne les poutres et la partie commune. De préférence, les électrodes d'une même face parallèle au plan de la plaque comprennent :

- une électrode centrale en forme de Y dont deux bras symétriques longent des faces d'épaisseur internes des deux poutres qui sont en vis-à-vis, et dont une queue relie un point central de l'élément intermédiaire de liaison,

- deux électrodes externes symétriques qui recouvrent chacune au moins 25% de la partie de face parallèle au plan de la plaque appartenant à la partie commune, chacune dans une zone latérale opposée de cette partie commune, et qui relie chacune un point externe respectif de l'élément intermédiaire de liaison, et

- deux électrodes intermédiaires symétriques, chacune ayant un bras qui longe une face d'épaisseur externe de l'une des poutres, une partie de retour qui entoure une extrémité de l'une des électrodes externes opposée à l'élément intermédiaire de liaison, et une queue reliant un point intermédiaire respectif de l'élément intermédiaire de liaison, entre le point central et l'un des points externes.

Il est possible de détecter la vibration du diapason en connectant un amplificateur de charges différentiel aux électrodes qui permet de générer une tension électrique représentative de l'amplitude de la vibration.

Au-delà de la conformation particulière d'un résonateur selon l'invention, une dernière voie d'amélioration vise la

restitution de l'énergie perdue due au couplage acoustique entre le résonateur et son environnement.

L'invention vise donc aussi un dispositif comportant un résonateur mécanique selon l'invention et un moyen de
5 confinement acoustique disposé à proximité du résonateur et réfléchissant l'énergie acoustique émise par le résonateur.

Ce moyen est une cavité acoustique résonante, caractérisée en ce que :

- elle possède une fréquence propre de résonance
10 acoustique égale à la fréquence propre de résonance mécanique du diapason.

- le mode acoustique résonnant à la fréquence propre de résonance acoustique présente des nœuds et des ventres tels que chacun des deux chants intérieurs du résonateur se situe
15 au niveau d'un ventre central et que chacun des deux chants extérieurs se situe au sein de ventres en opposition de phase avec le ventre central.

- pour maximiser le facteur de qualité acoustique, le matériau des parois de la cavité doit être rigide.

20 Un résonateur mécanique selon notre invention est donc très bien couplé à ce mode acoustique car ses dimensions sont compatibles avec la longueur d'onde acoustique, et donc avec la distribution spatiale du mode de pression.

25 La figure 1 illustre un résonateur de l'art antérieur de type diapason horloger.

La figure 2A illustre la variation de pression ΔP existant entre les deux chants d'une poutre de largeur W_b du résonateur de la figure 1.

30 La figure 2B illustre la variation de pression $\Delta P'$ existant entre les deux chants d'une poutre de largeur W_b' d'un résonateur selon l'invention.

La figure 3A illustre un diapason selon l'invention comportant deux poutres de largeur W_b' .

35 La figure 3B illustre une conformation optimisée d'électrodes de détection d'un diapason optimisé selon l'invention.

La figure 4A illustre le principe d'un diapason équipé de son moyen de confinement acoustique, avec une onde de pression stationnaire représentée en 1D.

Les figures 4B et 4C illustrent une des formes possibles pour le moyen de confinement acoustique, à savoir une cavité cylindrique vue de face et de dessus.

L'idée à la base de l'invention est de définir un objet simple présentant un couplage acoustique élevé dans les conditions de mise en œuvre des résonateurs : forme, nature du matériau constitutif de l'objet, mode vibratoire et nature du fluide.

L'objet choisi est une poutre parallélépipédique adaptée de longueur Lb' , de largeur Wb' et d'épaisseur T' , du type de celle constituant une branche de diapason de l'art antérieur. Elle est réalisée dans un matériau rigide, par exemple de type quartz ou silicium. La vibration de résonance de la poutre est une vibration de flexion dans le plan défini par ses longueur et largeur. Les modes de vibration sont le mode fondamental et, éventuellement, les modes harmoniques. Les fluides sont des gaz ou des mélanges de gaz comme l'oxygène, l'azote, le gaz carbonique, l'oxyde de carbone, l'hydrogène, l'hélium.

On appelle chants de la poutre les deux faces définies par la longueur Lb' et l'épaisseur T' de la poutre.

Les pertes d'énergie d'une poutre résonnante dans les conditions de mise en œuvre de l'invention sont de trois types : les pertes acoustiques, les pertes visqueuses et les pertes dans le support, ce dernier type de perte étant le seul essentiellement rencontré dans les résonateurs de type horloger encapsulés sous vide si l'on néglige les pertes thermoélastiques (Frédéric Lochon, Isabelle Dufour, Dominique Rebiere « A microcantilever chemical sensors optimization by taking into account losses ». Sensors and Actuators B : Chemical, Elsevier, 2006,118, pp 292-296).

Pour exprimer l'influence des pertes d'un résonateur, le facteur de qualité est un moyen pratique. Le facteur de

qualité d'un résonateur est défini comme étant le rapport entre l'énergie stockée dans le résonateur, sous forme d'énergie cinétique et potentielle de déformation, et l'énergie perdue au cours d'un cycle d'oscillation.

5 Le facteur de qualité global Q_g du résonateur est défini par la formule :

$$1/Q_g = 1/Q_a + 1/Q_v + 1/Q_s$$

avec

Q_a = facteur de qualité acoustique

10 Q_v = facteur de qualité visqueux

Q_s = facteur de qualité support

Cette formule souligne que c'est le facteur de qualité le plus faible qui dégrade le facteur de qualité global, la configuration optimale étant obtenue lorsque les facteurs de qualité sont égaux et le plus élevés possible.

15 Contrairement à cette approche, l'invention vise à définir les dimensions de la poutre afin d'augmenter le couplage acoustique de celle-ci avec le fluide environnant. En conséquence, les pertes acoustiques sont importantes ce qui va à l'encontre des enseignements de l'état de l'art.

20 La dimension caractérisante de l'invention est la largeur Wb' de la poutre. Dans l'état de l'art il n'existe pas de relation liant la largeur de la poutre à la longueur d'onde de l'onde émise à la fréquence de résonance f de la poutre.

25 Sur les figures 2, la longueur d'onde est en abscisse et la pression en ordonnée. Sur ces figures, la largeur de la poutre Wb ou Wb' , représentée en gris, est superposée à l'onde acoustique sinusoïdale à la fréquence de résonance f de la poutre. L'onde acoustique représentée est plane afin de faciliter la compréhension. Si l'onde vient d'une source extérieure, la source est très éloignée de la poutre et dans le plan de vibration de flexion de celle-ci. Si l'onde acoustique est générée par la poutre en mouvement, les déplacements de celle-ci sont négligés.

Dans le cas général illustré à la figure 2A, la variation de pression ΔP entre les chants de la poutre liée à sa largeur est faible. En revanche, dans le cas de l'invention, illustré à la figure 2B, la variation de pression $\Delta P'$ entre les chants de la poutre, séparés d'une distance égale à la moitié de la longueur d'onde, est maximale puisque les variations de pression sur chaque chant sont en opposition de phase.

Dans le cas d'une source extérieure, l'onde incidente crée un effort sur un chant d'amplitude égale et de signe opposé à l'effort appliqué sur l'autre chant, ce qui induit que les deux efforts s'additionnent de façon optimale pour exciter le mode de vibration en flexion de la poutre.

Généralement, l'onde acoustique n'est pas plane et il n'est pas possible d'obtenir des efforts en opposition de phase sur la surface des deux chants de la poutre. Dans ces conditions, la largeur W_b est comprise entre $\lambda/4 + n\lambda$ et $3\lambda/4 + n\lambda$, n étant un entier positif ou nul.

Ces dimensions s'appliquent aussi dans le cas où c'est la poutre qui génère l'onde acoustique. La dimension de largeur ainsi définie augmente le couplage acoustique de la poutre avec le fluide environnant.

Par ailleurs, les performances d'un résonateur selon l'invention ont été améliorées en limitant les pertes d'énergie des deux autres types : les pertes visqueuses et les pertes dans le support.

Pour limiter les pertes visqueuses d'un résonateur poutre optimisé de l'invention, la longueur L_b' de la poutre est un paramètre important car il détermine la fréquence de résonance. Le mode de flexion fondamental permet d'obtenir l'un des meilleurs facteurs de qualité.

Pour une poutre encastree, l'élancement varie en fonction du matériau constitutif et du fluide environnant.

Les élancements optimisés pour une poutre encastree à l'une de ses extrémités, comme représentés sur la figure 3A pour le quartz et le silicium dans l'air, l'hélium,

l'hydrogène, l'oxygène et le gaz carbonique sont présentés dans le tableau ci-dessous :

	CO ₂	O ₂	Air	He	H ₂
Quartz	2.6	2.4	2.3	1.4	1.2
Silicium	3.2	2.9	2.8	1.7	1.45

5 L'épaisseur T' de la poutre est de l'ordre du quart de la largeur Wb' de la poutre.

Pour une poutre encastree à ses deux extrémités, l'élanacement est compris entre 2 et 5 selon le matériau et la nature du fluide.

10 Pour limiter les pertes dans le support, il est connu que les performances d'une poutre unique sont moins bonnes que celles d'un diapason. Ce type de résonateur a donc été étudié pour être mis en œuvre dans le cadre de l'invention.

15 Le faible élanacement des poutres conformes à l'invention modifie la nature des contraintes au niveau de la zone d'encastrement sur la partie commune fixée au support.

En particulier il existe des contraintes élevées de cisaillement dans la zone d'encastrement.

20 Il en résulte une conformation particulière du diapason de l'invention, illustrée à la figure 3A, qui augmente notablement la contribution de la partie commune à la vibration du résonateur et à la détection de ladite vibration.

25 Pour cet exemple de réalisation, la fréquence est égale à 42 500 Hz, soit une longueur d'onde de 8 mm dans l'air dans les conditions normales de pression, le matériau utilisé est du quartz sous forme d'une plaque plane usinée de dimensions $L' = 23.75$ mm, soit 2.97λ , par $W' = 13.8$ mm, soit 1.72λ et d'épaisseur $T' = 1$ mm, soit $\lambda/8$.

30 Le plan de la plaque est sensiblement parallèle au plan cristallographique XY du quartz, et les axes longitudinaux des branches $1'$ sont sensiblement parallèles à l'axe cristallographique X du quartz (contrairement au diapason horloger montré à la figure 1A, dont les branches sont

sensiblement parallèles à l'axe cristallographique Y du quartz). Le diapason 100 est symétrique par rapport à un plan π perpendiculaire au plan de la plaque.

Le diapason 100 est formé de deux branches sensiblement
5 parallélépipédiques 1' de longueur $Lb' = 6,8$ mm, soit 0.85λ ,
et de largeur $Wb' = 4$ mm, soit 0.5λ , identiques et
solidaires, chacune à une extrémité, d'une partie commune 2'
constituée des quatre zones 21, 22, 23, 24 délimitées par des
traits en pointillés.

10 La partie commune 2' est solidaire d'un bras de fixation
3 au niveau de la zone 24 opposée à la zone 21 solidaire des
deux branches.

La zone de raccordement 21 entre les branches 1' et la
partie principale 22 de la partie commune 2' présente une
15 forme de trapèze isocèle dont les chants 211 tournés vers
l'extérieur relie les chants extérieurs des branches aux
chants de la partie commune principale 22 avec une
inclinaison d'un angle A valant sensiblement 120° par rapport
à l'axe X (ce qui permet, dans le cas où le diapason est
20 réalisé par usinage chimique, d'éviter la formation de
facettes obliques sur lesdits chants). La hauteur de ce
trapèze est d'environ 1,4 mm.

De façon analogue la zone 23 permettant de raccorder les
zones 22 et 24 de la partie commune 2' présente un angle de
25 120° par rapport à l'axe X cristallographique du quartz. La
hauteur de ce trapèze vaut environ 3,5 mm.

Le diapason 100 est fixé, par exemple par collage, sur
une embase de boîtier B (non représentée) au niveau des
surfaces 31 (montrées par des hachures) du bras de fixation
30 3.

L'épaisseur T' de la plaque et la largeur de la fente
 Ws' sont sensiblement égales à 1 mm, soit $\lambda/8$. De façon
générale, l'épaisseur T' et la distance W' sont voisines,
c'est-à-dire que la distance Ws' peut être comprise entre 0,5
35 et 2 fois l'épaisseur T' de la plaque.

La partie commune 2' est solidaire des deux branches au niveau de la zone de raccordement 21 qui permet de raccorder les branches à la zone 22 de forme rectangulaire, et dont la dimension W' prise perpendiculairement au plan π est supérieure à la largeur $(2Wb' + Ws')$ contenant les deux branches : W' vaut sensiblement 1,5 fois $(2Wb' + Ws')$. Par ailleurs, la dimension $L22$ de la zone 22 prise parallèlement à l'axe X vaut sensiblement la moitié de la longueur Lc' de la partie commune 2'. Par exemple, Lc' vaut 15.45 mm, soit 1,93 λ et $L22$ vaut 7,6 mm, soit 0,95 λ .

La largeur $W24$ de la zone 24 est très inférieure à W' : $W24$ vaut sensiblement 1,6 mm, soit $\lambda/5$.

Dans ces conditions, la surface de la partie commune 2' vaut environ trois fois la surface totale $2.Lb'.Wb'$ des deux branches 1'. Pour le diapason selon l'invention, la masse de matière de la partie commune est donc nettement plus important que celui des deux branches, contrairement au cas du diapason horloger.

La figure 3B montre en vue de face des électrodes équipant le résonateur 100 de la figure 3A et permettant, par effet piézoélectrique, de détecter la vibration du résonateur. Les électrodes sont sous la forme de plages conductrices 41, 42 et 51, représentées par des zones hachurées, disposées sur les deux grandes faces de la plaque, et agissant dans les branches 1' et dans la partie commune 2'. Les électrodes 41 et 42 ont la même polarité électrique, différente de la polarité de l'électrode 51. Les électrodes 41, 42 et 51 disposées sur l'une des grandes faces sont directement en regard respectivement des électrodes 41, 42 et 51 disposées sur l'autre grande face (indiquées à l'aide d'un trait de référence en pointillé), et chacune des électrodes a la même polarité électrique que l'électrode disposée en regard sur l'autre grande face.

Les formes relativement complexes des électrodes 41, 42 et 51 sont issues de simulations numériques par éléments finis et sont liées à la distribution relativement complexe des contraintes mécaniques générées par la vibration du

diapason, ces contraintes étant de trois types : la contrainte d'extension/compression T_{XX} suivant l'axe X, la contrainte d'extension/compression T_{YY} suivant l'axe Y, et la contrainte de cisaillement T_{XY} dans le plan XY. La conformation des électrodes est caractéristique du fait qu'elles concernent indifféremment les poutres de façon classique, mais aussi la partie commune 2'. Les électrodes 41, 42 de même polarité, et les électrodes 51 sont raccordées à des plages de connexion respectivement 70 et 71 situées sur le bras de fixation 3, au moyen de pistes de raccordement de type référencé 60.

Ainsi, les plages de connexion 70 et 71 connectent respectivement les deux polarités de la totalité des électrodes, le diapason équipé de ses électrodes constituant un dipôle lié de façon piézoélectrique à la vibration.

Il est possible de détecter la vibration du diapason, par exemple en connectant les plages 70 et 71 à un amplificateur de charges différentiel (non représenté) qui permet de générer par exemple une tension électrique représentative de l'amplitude de la vibration. On notera que les électrodes montrées à la figure 3B, étant disposées seulement sur les deux grandes faces de la plaque, sont bien adaptées à des fabrications à faible coût. Par exemple, lorsque la structure du résonateur est obtenue par gravure chimique d'un wafer en quartz, les électrodes peuvent être aisément réalisées par gravure des masques métalliques recto et verso qui ont préalablement été utilisés pour la gravure chimique du quartz.

L'invention vise à concevoir un résonateur pour fonctionner dans un fluide. Or le résonateur décrit présente des pertes acoustiques importantes, ce qui n'est pas favorable en l'état à l'obtention d'un facteur de qualité global élevé.

Pour obtenir un dispositif optimisé conforme à l'invention et ayant un facteur de qualité élevé, il faut adjoindre au résonateur décrit ci-dessus un moyen apte à lui

restituer la quasi-totalité de l'énergie des pertes acoustiques dues à son couplage avec le fluide.

Le rôle du moyen apte à restituer l'énergie acoustique ou moyen de confinement est de renvoyer les ondes acoustiques émises par le résonateur sur lui-même afin de créer une nouvelle force d'excitation participant alors à la vibration.

Le moyen de confinement de l'invention est une cavité acoustique résonnante. Le résonateur est placé au cœur de la cavité acoustique résonnante, qui prend la forme d'une cavité creuse. Il est connu que toute cavité creuse présente le phénomène de résonance acoustique. Il existe donc des modes propres acoustiques de résonance au sein de cette cavité, et chacun est associé à une fréquence de résonance et un facteur de qualité. Ces trois paramètres peuvent par exemple être calculés pour une forme quelconque par des logiciels de simulation par éléments finis.

La cavité acoustique selon l'invention, associée au résonateur mécanique en flexion, est caractérisé en ce que :

- elle possède une fréquence propre de résonance acoustique égale ou proche de la fréquence propre de résonance mécanique du diapason.

- le mode propre acoustique résonnant, correspondant à la fréquence propre de résonance acoustique du point précédent, présente des nœuds et des ventres suivant la position dans la cavité. Les ventres peuvent correspondre soit à des surpressions (+), soit à des dépressions (-). La majorité de la surface des deux chants intérieurs doit se situer au sein de ventres de même signe, c'est-à-dire soit une surpression, soit une dépression. La majorité de la surface des deux chants extérieurs doit également se retrouver au sein de ventres de même signe, mais de signe opposés à ceux des chants intérieurs.

- le facteur de qualité acoustique du mode précédemment décrit doit être maximisé. A titre d'exemple, le matériau utilisé pour réaliser les parois de la cavité doit être rigide.

Un résonateur mécanique selon notre invention est donc très bien couplé à ce mode acoustique dans la mesure où ses dimensions sont compatibles avec la longueur d'onde acoustique, et donc avec la distribution spatiale du mode de pression (dont la distance entre les ventres successifs est
5 justement égal à $\lambda/2$).

Une illustration simplifiée est présentée sur la figure 4A, où l'on a tracé les ventres de surpression (+) et les ventres de dépression (-) du mode acoustique résonnant.
10 L'onde représentée possède bien cette propriété d'avoir une dépression pour les deux chants intérieurs au diapason, et une surpression pour les deux chants extérieurs.

Une autre illustration à la figure 4B montre le même principe pour une cavité de forme cylindrique de directrice
15 circulaire de rayon λ , vue de face à la même échelle que celle du capteur. Le mode acoustique est alors radial et on voit bien que les chants occupent bien majoritairement les zones avec les signes voulus.

La figure 4C montre une vue de dessus de la même cavité.
20 Les facteurs de qualité typiques de résonateurs de type diapason dans un fluide respectivement de type horloger, du type selon l'invention seul et de type optimisé sont repris dans le tableau ci-dessous avec les facteurs de qualité globaux correspondant :

25

	Q_s	Q_v	Q_a	Q_g
Horloger	80 000	10 000	2 000 000	8850
Invention	400 000	100 000	7 000	6437
Optimisé	400 000	100 000	400 000	66 667

Le facteur de qualité pénalisant des résonateurs horlogers, est celui de l'amortissement visqueux qui est lié
30 à leurs petites dimensions, nécessaires à leurs applications.

Le facteur de qualité est proportionnel au rapport surface/volume.

Le résonateur diapason de l'invention présente bien des facteurs de qualité support et visqueux améliorés par rapport au diapason horloger mais son facteur de qualité acoustique est fortement dégradé, comme souhaité.

Le facteur de qualité acoustique du dispositif optimisé comportant un résonateur de l'invention est très élevé du fait de la coopération du résonateur avec la cavité résonnante.

Le dispositif optimisé présente, comme il est souhaitable, des facteurs de qualité élevés et de valeurs voisines, c'est-à-dire dans une fourchette de 1 à 4 contre une fourchette de 1 à 200 pour un diapason horloger de l'état de l'art.

REVENDICATIONS

1- Résonateur mécanique (100), réalisé dans une plaque
5 plane d'un matériau d'épaisseur T' , comportant une partie
commune (2') sur laquelle est encastrée au moins une poutre
parallélépipédique (1') de longueur Lb' , de largeur Wb' ,
lesdites longueur Lb' et largeur Wb' étant mesurées
10 parallèlement à la plaque, ladite poutre ayant un mode
résonnant en flexion dans un plan de la plaque à une
fréquence f à laquelle elle émet une onde acoustique de
longueur d'onde λ dans un fluide, poutre sur laquelle sont
disposées des électrodes,
caractérisé en ce que
15 la largeur Wb' est comprise entre $\lambda/4 + n\lambda$ et $3\lambda/4 + n\lambda$, n
étant un entier positif ou nul.

2- Résonateur selon la revendication 1, caractérisé en
ce que la largeur Wb' est égale à $\lambda/2 + n\lambda$.

3- Résonateur selon la revendication 1 ou 2,
20 caractérisé en ce que la poutre est encastrée à ses deux
extrémités et que le mode résonnant est le mode fondamental
en flexion, un rapport de la longueur Lb' de la poutre sur la
largeur Wb' de la poutre étant compris entre 2 et 5.

4- Résonateur selon la revendication 1 ou 2,
25 caractérisé en ce que la poutre est encastrée à une seule de
ses extrémités, et en ce que le mode résonnant est le mode
fondamental en flexion, un rapport de la longueur Lb' de la
poutre sur la largeur Wb' de la poutre étant compris entre
1,2 et 3,2.

30 5- Résonateur selon la revendication 4, caractérisé en
ce qu'il comporte deux poutres (1') identiques, disposées
parallèlement et formant diapason, encastrées sur la partie
commune massive (2') dont une masse est comprise entre 2 et 4
fois celle des deux poutres.

6- Résonateur selon la revendication 5, caractérisé en ce que la partie commune (2') a une forme d'un parallélépipède rectangle (22) dont une longueur W' est supérieure au double de la largeur Wb' de chaque poutre (1') et une hauteur (L22) est supérieure à la longueur Lb' de chaque poutre, et de part et d'autre de ce parallélépipède sont disposés deux trapèzes isocèles (21, 23) dont des grandes bases ont une longueur égale à la longueur de la partie commune, les deux poutres (1'), disposées
5
10 parallèlement à une distance Ws' comprise entre 0,5 et 2 fois l'épaisseur T' de la plaque, sont encastrées sur une petite base d'un premier des trapèzes isocèles (21), des faces d'épaisseur externes des poutres du diapason coïncidant avec des extrémités de cette petite base du premier trapèze
15 isocèle, une petite base du second trapèze isocèle (23) supporte un élément de liaison intermédiaire (24) reliant le résonateur à un support, une longueur de ladite petite base du second trapèze isocèle étant inférieure à une moitié de la largeur Wb' d'une des poutres.

7- Résonateur selon la revendication 6, caractérisé en ce que les électrodes sont disposées sur des faces de chaque poutre (1') et de la partie commune (2') qui sont parallèles au plan de la plaque, dont elles occupent une surface totale hormis des zones d'isolation inter électrodes, lesdites zones
25 d'isolation occupant moins de 20% de la surface totale desdites faces parallèles au plan de la plaque.

8- Résonateur selon la revendication 7, caractérisé en ce que les électrodes d'une même face parallèle au plan de la plaque comprennent : une électrode centrale (41) en forme de
30 Y dont deux bras symétriques longent des faces d'épaisseur internes des deux poutres (1') qui sont en vis-à-vis, et dont une queue relie un point central de l'élément intermédiaire de liaison (24), deux électrodes externes (42) symétriques qui recouvrent chacune au moins 25% de la partie de face
35 parallèle au plan de la plaque appartenant à la partie commune (2'), chacune dans une zone latérale opposée de

ladite partie commune, et qui relie chacune un point externe respectif de l'élément intermédiaire de liaison, et deux électrodes intermédiaires (51) symétriques, chacune ayant un bras qui longe une face d'épaisseur externe de l'une des poutres, une partie de retour qui entoure une extrémité de l'une des électrodes externes opposée à l'élément intermédiaire de liaison, et une queue reliant un point intermédiaire respectif de l'élément intermédiaire de liaison, entre le point central et l'un des points externes.

10 **9-** Dispositif comportant un résonateur mécanique (100) selon l'une des revendications 1 à 8, caractérisé en ce qu'il comporte un moyen de confinement acoustique disposé à proximité du résonateur et réfléchissant l'énergie acoustique émise par le résonateur.

15 **10-** Dispositif selon la revendication 9 prise en dépendance d'une des revendications 5 à 8, caractérisé en ce que le moyen est une cavité acoustique résonnante à la fréquence de résonance mécanique du diapason, le mode acoustique résonnant de la cavité présentant des nœuds et des ventres tels que chacune des deux faces d'épaisseur intérieures des poutres du résonateur se situe au niveau d'un ventre central et que chacune des deux faces d'épaisseur extérieures des poutres se situe au niveau de ventres en opposition de phase avec le ventre central.

25

1/5

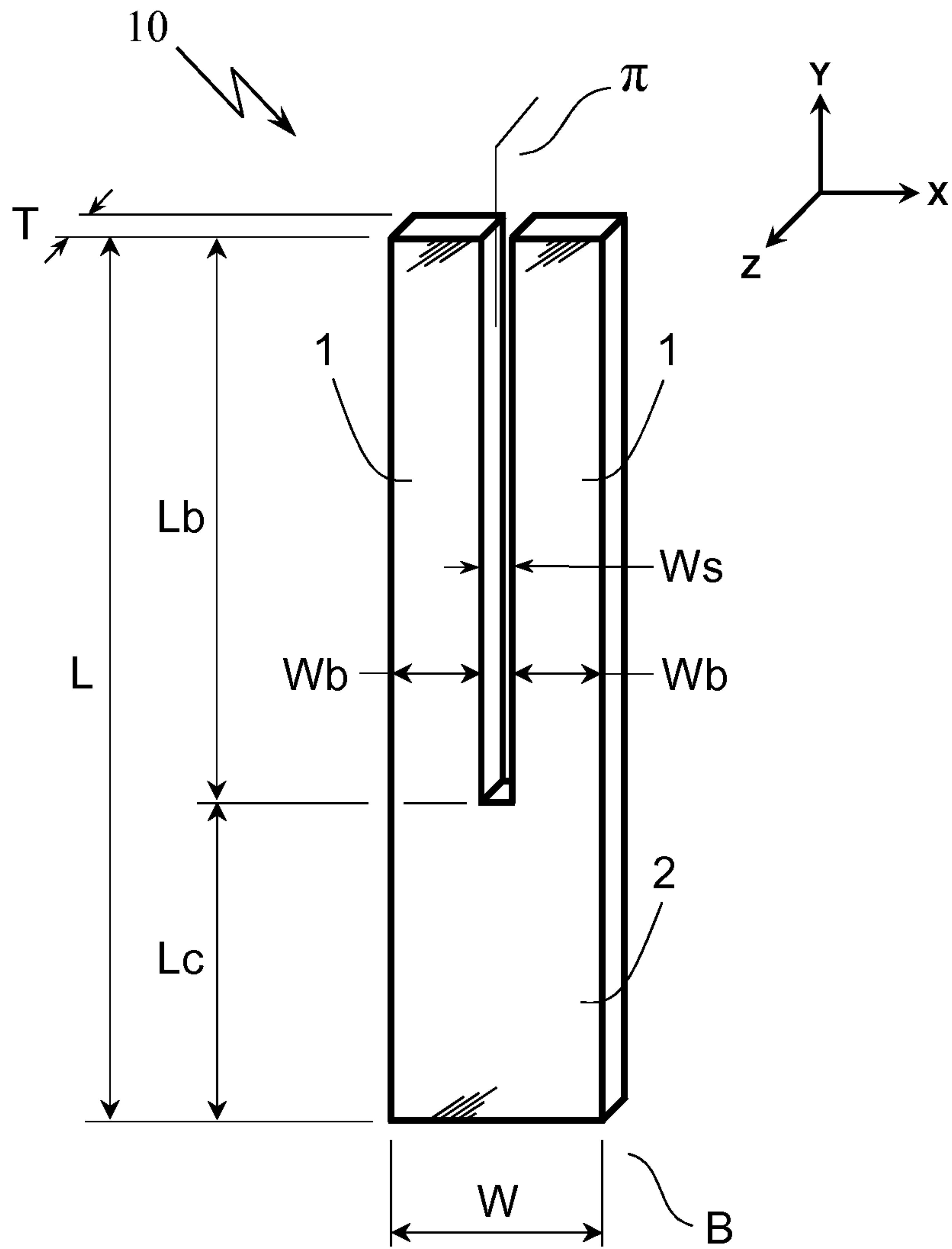


FIG. 1
(TECHNIQUE
ANTERIEURE)

2/5

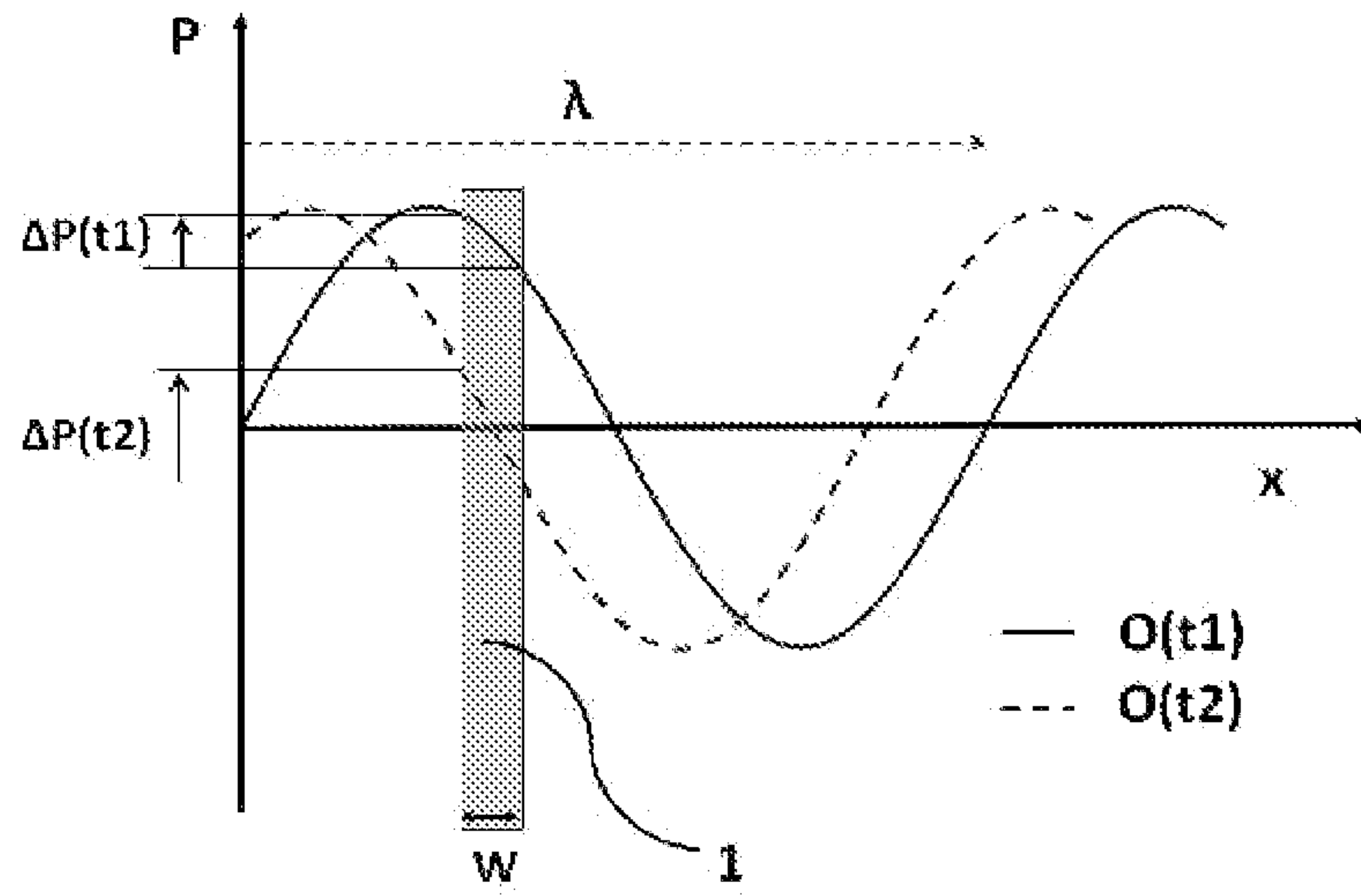


FIG 2A (TECHNIQUE ANTERIEURE)

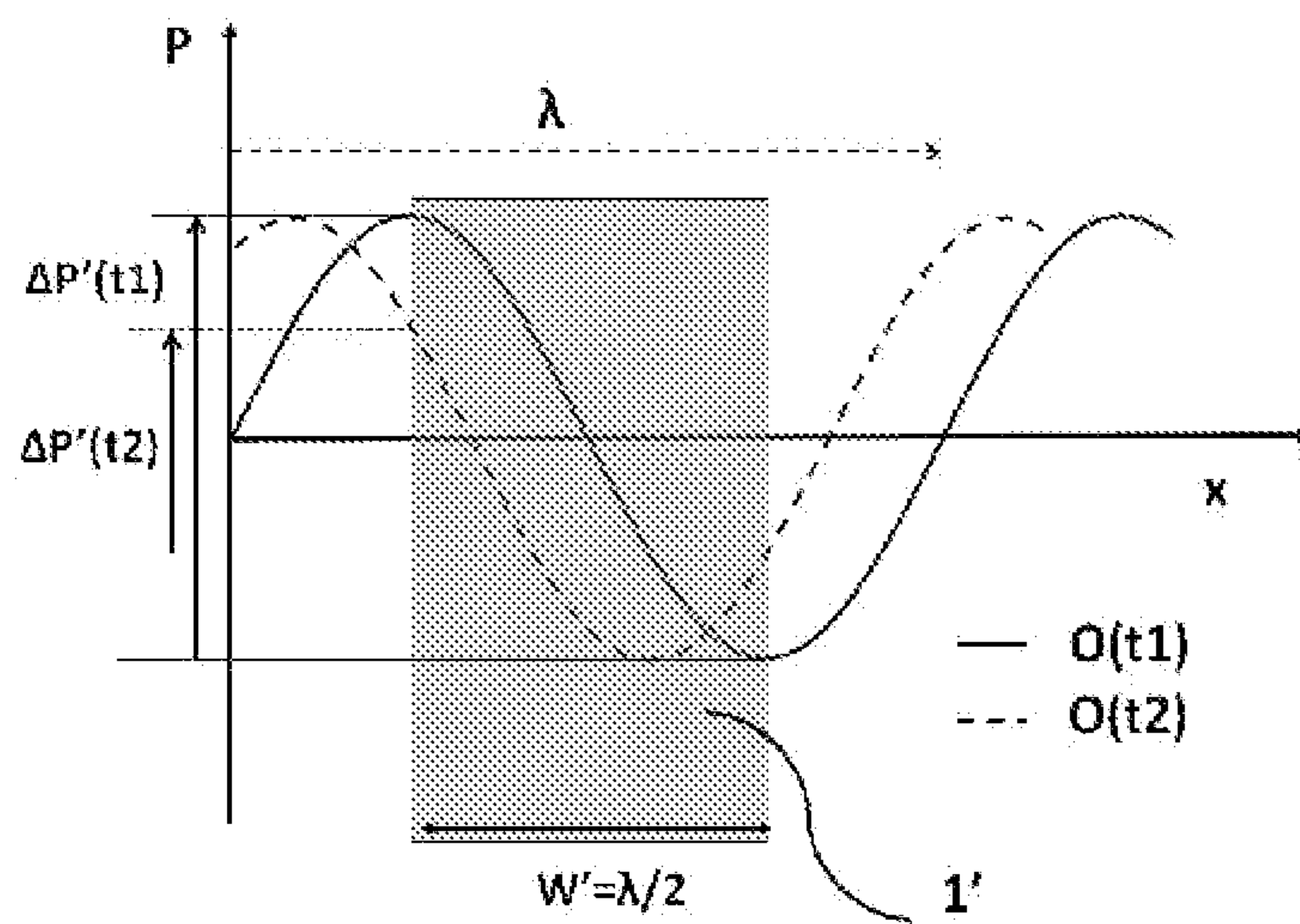


FIG 2B

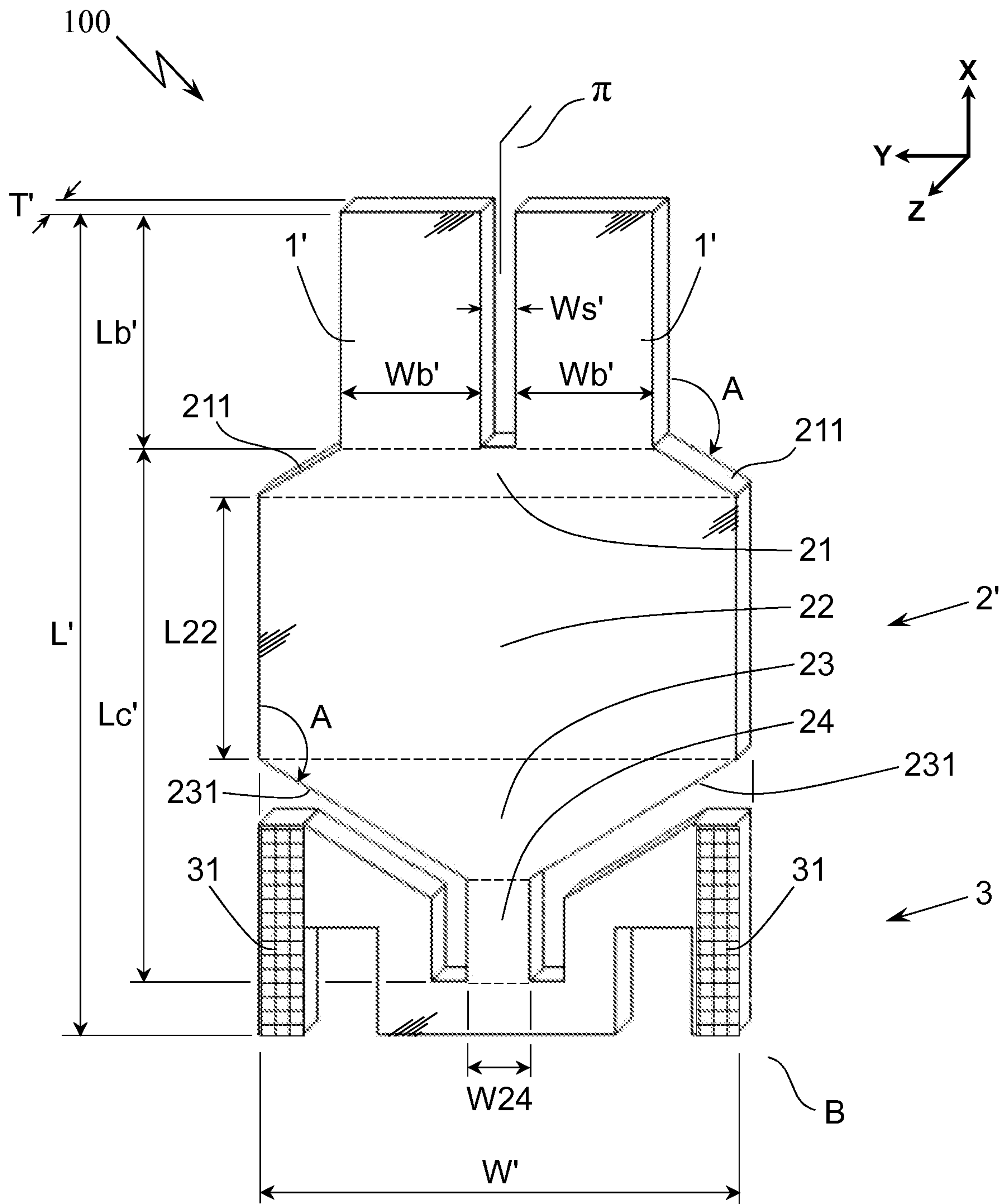


FIG. 3A

4/5

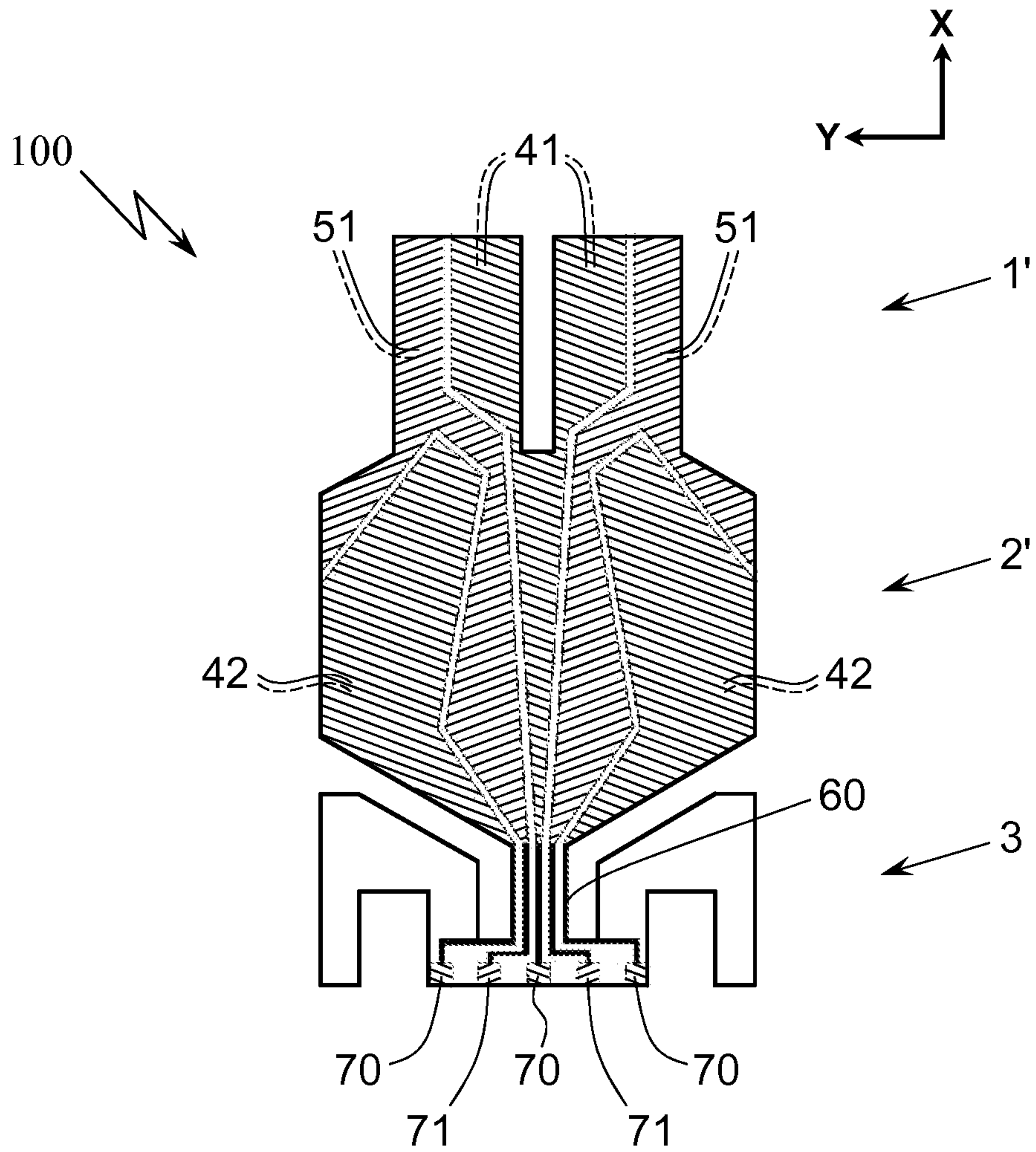


FIG. 3B

5/5

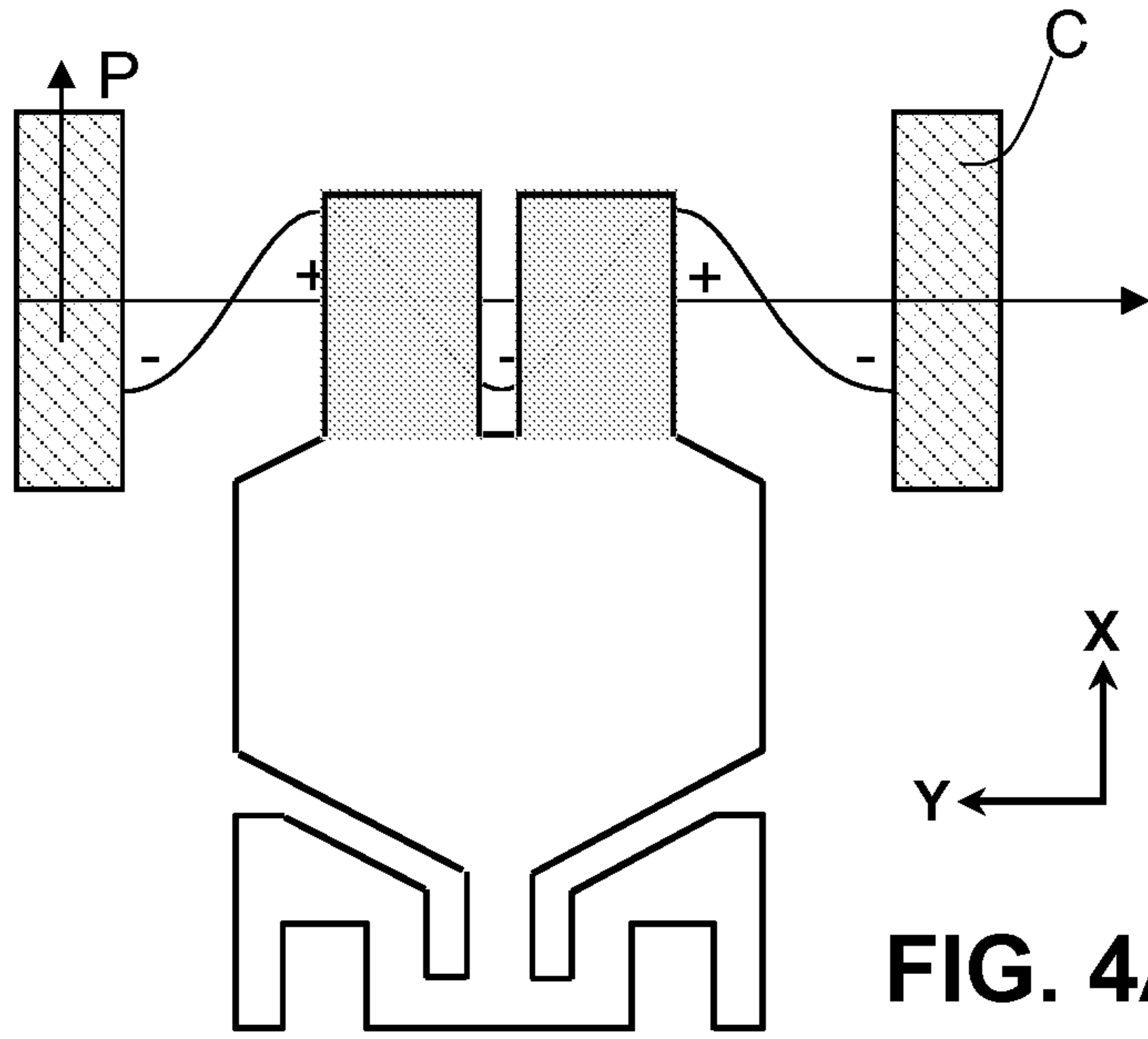


FIG. 4A

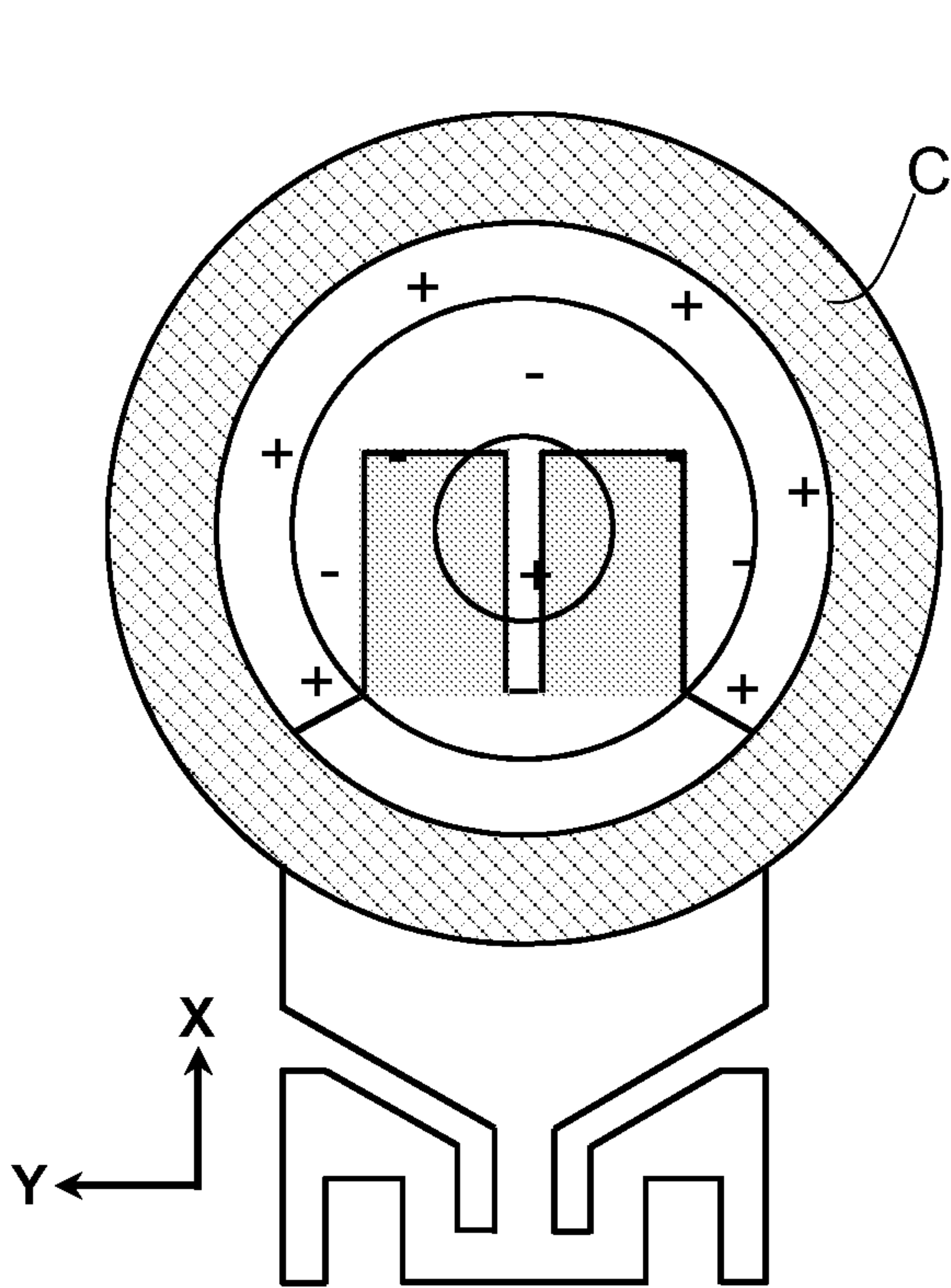


FIG. 4B

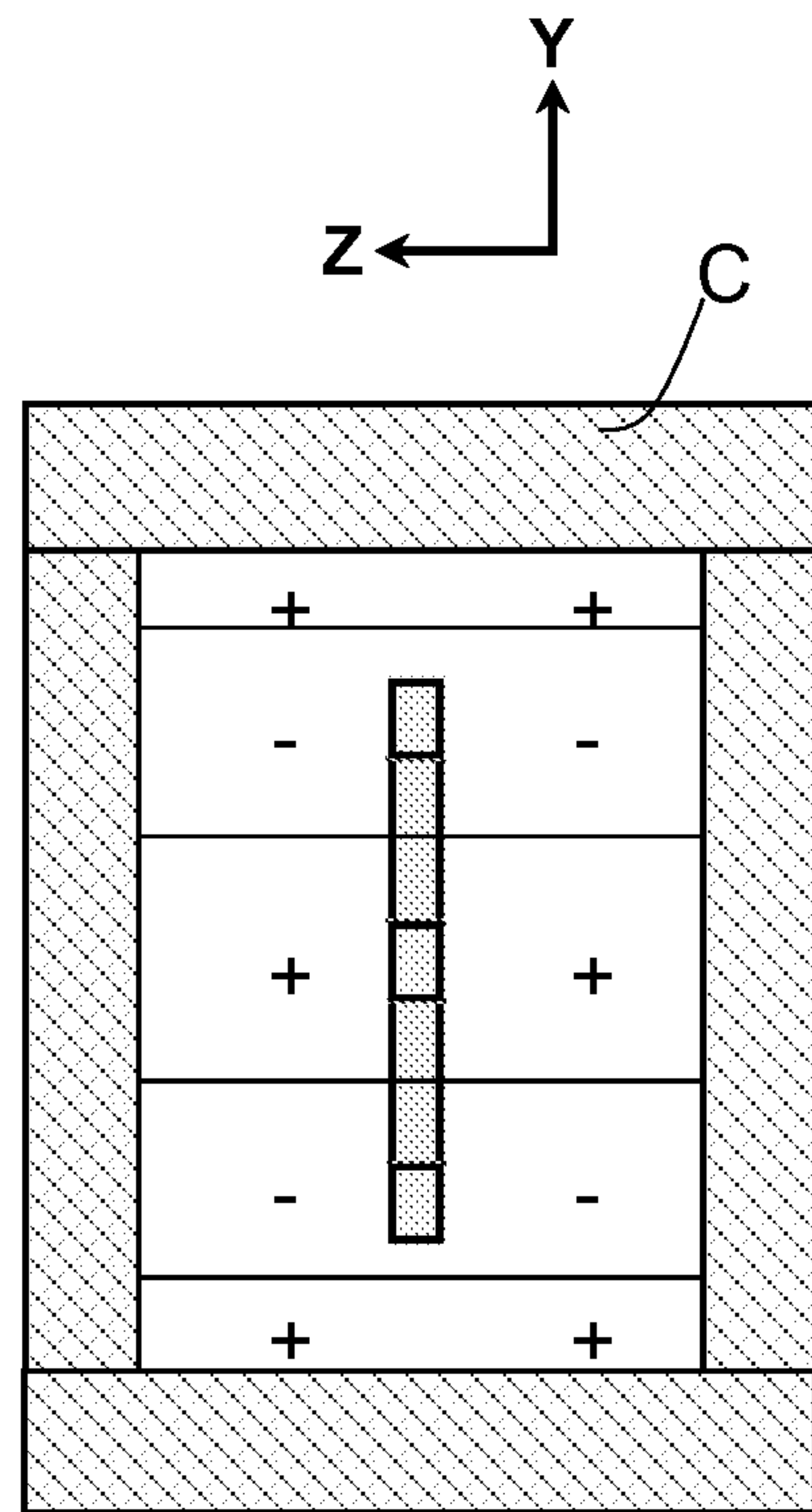


FIG. 4C

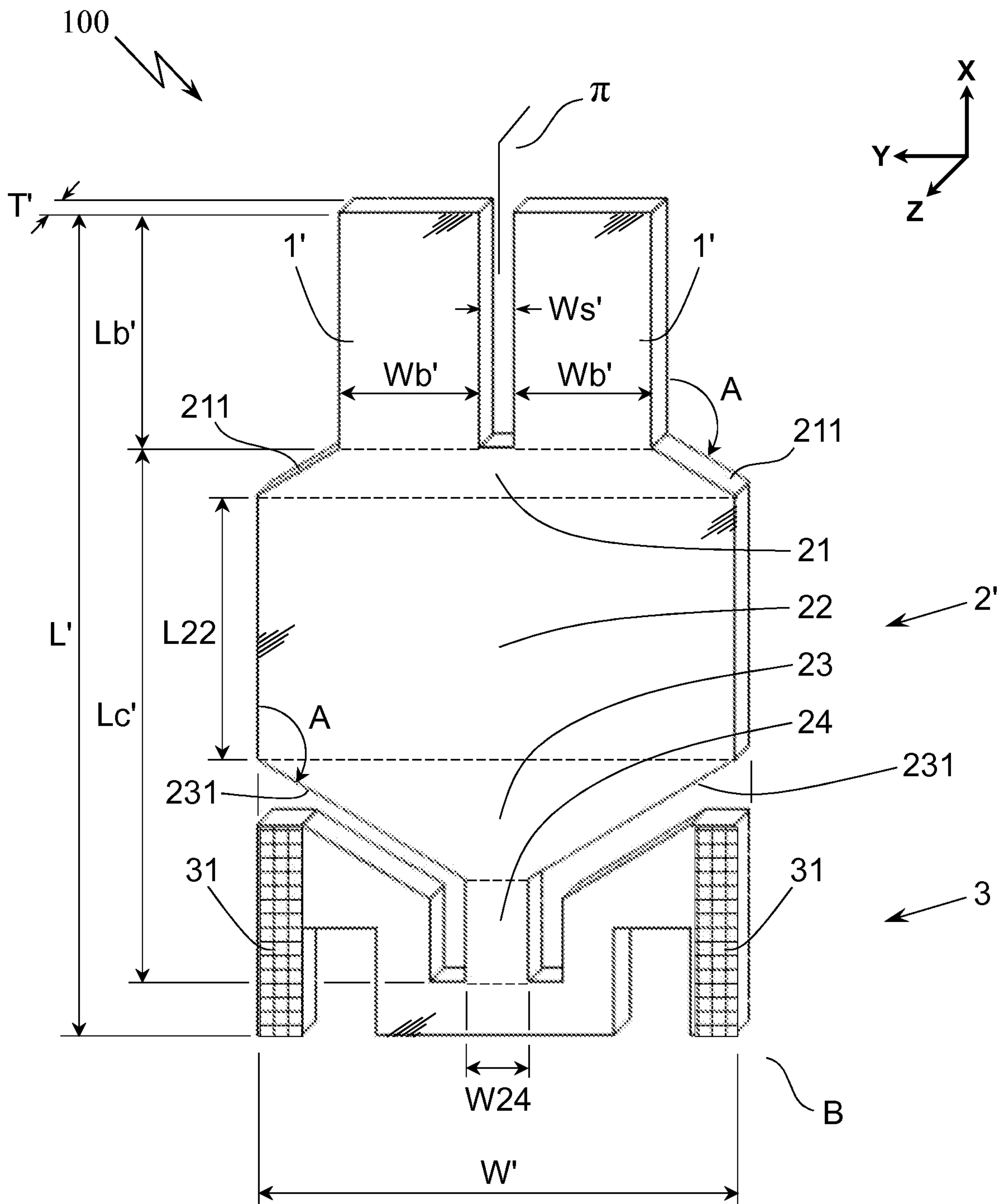


FIG. 3A