



(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

- (43)

Date de publication:
10.01.2024 Bulletin 2024/02
- (51)

Classification Internationale des Brevets (IPC):
H01Q 1/22 (2006.01) H01Q 5/40 (2015.01)
H01Q 7/00 (2006.01) H01Q 23/00 (2006.01)
- (21)

Numéro de dépôt: 23184170.1
- (52)

Classification Coopérative des Brevets (CPC):
H01Q 1/2225; H01Q 5/40; H01Q 7/00; H01Q 23/00
- (22)

Date de dépôt: 07.07.2023

(84) Etats contractants désignés: AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC ME MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR Etats d'extension désignés: BA Etats de validation désignés: KH MA MD TN (30) Priorité: 08.07.2022 FR 2207029 (71) Demander: Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives 75015 Paris (FR)	(72) Inventeurs: • ALCESILAS, Romain 38054 GRENOBLE CEDEX 9 (FR) • SANSA PERNA, Marc 38054 GRENOBLE CEDEX 9 (FR) • JOUVAUD, Camille 38054 GRENOBLE CEDEX 9 (FR) (74) Mandataire: Lavoix 2, place d'Estienne d'Orves 75441 Paris Cedex 09 (FR)
---	--

(54)

COMPOSANT ÉLECTRONIQUE SANS-FIL PASSIF ET SYSTÈME DE LECTURE ASSOCIÉ

- (57)

L'invention concerne un composant électronique sans-fil passif (2) comporte au moins une antenne (14), la ou chaque antenne ayant une fréquence d'antenne associée, et comprenant au moins un composant microélectromécanique résonant, ayant une fréquence de résonance et connecté à un point de contact de ladite antenne, formant un ensemble antenne-résonateur adapté à recevoir un signal électromagnétique incident (S_i) comportant au moins deux fréquences et à émettre un signal électromagnétique rétrodiffusé (S_r). Ce com-
- posant électronique sans-fil passif (2) est tel que la ou chaque antenne (14) comporte au moins deux composants microélectromécaniques (16, 18), MEMS, résonants à actionnement non-linéaire, chacun desdits composants MEMS ayant une fréquence de résonance mécanique propre appartenant à une plage de fréquences de résonance, les plages de fréquences de résonance associées à deux composants MEMS distincts étant disjointes.

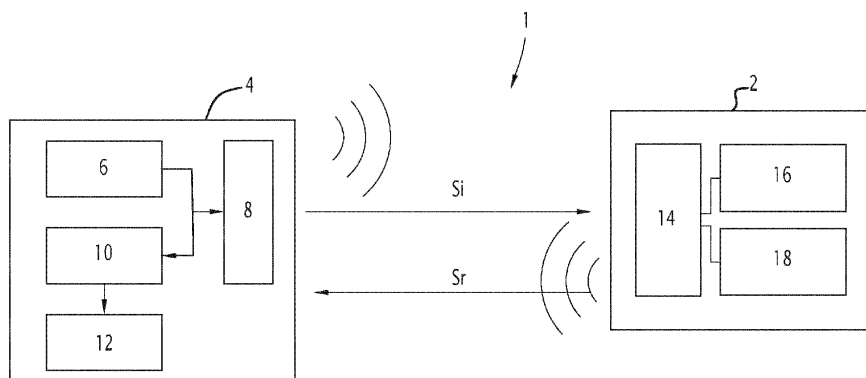


FIG.1

Description

[0001] La présente invention concerne un composant électronique sans-fil passif et un système de lecture associé.

[0002] L'invention se situe dans le domaine des composants électroniques passifs, et plus particulièrement des capteurs et des résonateurs électroniques passifs.

[0003] On entend par composant électronique sans-fil passif un composant qui ne comprend pas de source d'énergie, ni de redresseur de puissance. Un tel composant est également appelé composant télé-alimenté.

[0004] Les capteurs sont, de manière connue, des composants électroniques ou bien électromécaniques adaptés à mesurer une grandeur physique, par exemple la température, la pression, l'humidité etc.

[0005] Divers types de capteurs passifs télé-alimentés ont été mis au point, de tels capteurs présentant l'avantage de fonctionner sans source d'énergie intégrée, ce qui permet de les rendre utilisables en environnement difficile, par exemple dans des installations fonctionnant à températures élevées.

[0006] Dans l'état de la technique, on distingue plusieurs familles de capteurs passifs sans-fil, notamment les capteurs à circuit résonant LC, les capteurs à ondes acoustiques et les capteurs à transduction électromagnétique.

[0007] Les capteurs à circuit résonant LC sont basés sur un capteur capacitif mis en série ou en parallèle avec une boucle inductive, formant un circuit résonant. La fréquence de résonance du circuit est modifiée par la variation de capacité du capteur en fonction de la grandeur physique à mesurer. De tels capteurs à circuit résonant présentent le désavantage d'une distance de lecture faible, inférieure à 10 cm.

[0008] Les capteurs à ondes acoustiques comportent un capteur à ondes acoustiques de surface ou SAW (de l'anglais « Surface Acoustic Wave ») ou à ondes acoustiques de volume ou BAW (de l'anglais « Bulk Acoustic Wave »), alimenté en énergie par une antenne, elle-même télé alimentée. Ce type de capteur présente des pertes dues à la double conversion entre onde acoustique et onde électromagnétique, mais aussi à la propagation de l'onde acoustique notamment.

[0009] Les capteurs à transduction électromagnétique associent un capteur à une antenne, qui réalise l'alimentation du capteur, le signal électromagnétique émis (ou rétrodiffusé) par l'antenne en réponse à un signal électromagnétique incident étant utilisé pour déterminer une valeur de grandeur physique mesurée, les propriétés du signal électromagnétique rétrodiffusé étant modifiées en fonction du capteur. De tels capteurs à transduction électromagnétique présentent l'inconvénient de la sensibilité de l'antenne à l'environnement extérieur. Par exemple, la température peut faire varier la permittivité du substrat sur lequel l'antenne est imprimée, et modifier la fréquence de résonance de l'antenne, et par conséquent induire une imprécision dans la valeur mesurée de la grandeur physique considérée.

[0010] Le brevet EP 2 478 636 B1, intitulé « Capteur MEMS sans-fil et son procédé de lecture » décrit un composant électronique, typiquement un capteur, comportant un ensemble formé d'une antenne et d'un résonateur de type micro-système électromécanique (MEMS) connecté à l'antenne, qui permet de réaliser une lecture d'une grandeur physique mesurée en fonction de la fréquence de résonance du résonateur MEMS, par une technique d'intermodulation. Le résonateur MEMS est caractérisé par deux paramètres, respectivement le facteur de qualité mécanique, la fréquence de résonance mécanique, l'antenne ayant une fréquence de résonance électrique, et au moins un de ces trois paramètres est sensible à la grandeur physique mesurée. La tension d'intermodulation permet de générer une oscillation du résonateur MEMS en réponse à une énergie électromagnétique incidente à deux fréquences différentes. Bien que plus robuste aux conditions d'environnement qu'une antenne, un tel résonateur MEMS peut néanmoins être également impacté par des conditions d'environnement, et fournir par conséquent une mesure de grandeur physique imprécise. De plus, dans cette technologie, l'antenne radiofréquence est une antenne unique adaptée au résonateur MEMS, en d'autres termes la limitation d'un seul résonateur MEMS par antenne est imposée, ce qui induit un encombrement important lorsque plusieurs capteurs sont requis.

[0011] L'invention a pour but de remédier aux inconvénients de l'état de la technique en fournissant un composant électronique passif d'encombrement limité et/ou de meilleure précision pour une mesure de grandeur physique.

[0012] A cet effet, l'invention propose, selon un aspect, un composant électronique sans-fil passif comportant au moins une antenne, la ou chaque antenne ayant une fréquence d'antenne associée, et comprenant au moins un composant microélectromécanique résonant, ayant une fréquence de résonance et connecté à un point de contact de ladite antenne, formant un ensemble antenne-résonateur adapté à recevoir un signal électromagnétique incident comportant au moins deux fréquences et à émettre un signal électromagnétique rétrodiffusé. Ce composant électronique est tel que la ou chaque antenne comporte au moins deux composants microélectromécaniques, MEMS, résonants à actionnement non-linéaire, chacun desdits composants MEMS ayant une fréquence de résonance mécanique propre appartenant à une plage de fréquences de résonance, les plages de fréquences de résonance associées à deux composants MEMS distincts étant disjointes.

[0013] Avantageusement, le composant électronique sans-fil passif proposé comporte au moins deux composants microélectromécaniques, MEMS, résonants sur une même antenne, les fréquences de résonance des deux composants MEMS résonants appartenant à des plages disjointes, ce qui permet de différencier les réponses des composants MEMS résonants à un signal électromagnétique incident comportant des fréquences choisies.

[0014] Le composant électronique sans-fil passif selon l'invention peut également présenter une ou plusieurs des caractéristiques ci-dessous, prises indépendamment ou selon toutes les combinaisons techniquement envisageables.

[0015] Il comporte un nombre N d'antennes, N étant supérieur ou égal à deux, chaque antenne comportant au moins deux composants microélectromécaniques, MEMS, résonants à actionnement non-linéaire, chaque antenne ayant une fréquence d'antenne propre, les fréquences d'antenne de deux antennes distinctes étant différentes.

[0016] Au moins un desdits au moins deux composants MEMS résonants est un résonateur capacitif.

[0017] Au moins un desdits au moins deux composants MEMS résonants est un capteur MEMS résonant dont la fréquence de résonance varie en fonction d'une grandeur physique prédéterminée.

[0018] La grandeur physique prédéterminée est une grandeur physique caractéristique d'un environnement du capteur MEMS résonant parmi la température, la pression d'air ou de gaz, l'humidité.

[0019] Le composant électronique sans-fil passif comporte une pluralité de capteurs MEMS résonants, chacun desdits capteurs MEMS résonants ayant une fréquence de résonance variant en fonction d'une grandeur physique distincte, ledit composant électronique passif étant adapté à fournir des mesures d'une pluralité de grandeurs physiques distinctes.

[0020] Le composant électronique sans-fil passif comporte au moins une paire d'un premier et d'un deuxième composants MEMS résonants, le premier composant MEMS étant un capteur MEMS résonant dont la fréquence de résonance varie en fonction d'une première grandeur physique à mesurer et en fonction d'au moins une deuxième grandeur physique, le deuxième composant MEMS de ladite paire étant un capteur MEMS résonant dont la fréquence de résonance ne varie pas en fonction de ladite première grandeur physique, la fréquence de résonance du deuxième capteur variant en fonction de ladite au moins une deuxième grandeur physique.

[0021] Lesdits au moins deux composants MEMS résonants sont connectés en série ou en parallèle.

[0022] Ladite au moins une antenne est réalisée sous forme de circuit imprimé sur un substrat, et lesdits composant MEMS sont réalisées sur une ou plusieurs puces en silicium, chaque composant MEMS étant relié à un élément d'antenne par pontage filaire.

[0023] Ladite antenne et lesdits au moins deux composants MEMS résonants sont implantés sur un même substrat en silicium.

[0024] Chaque composant MEMS résonant est formé par une membrane positionnée entre deux électrodes, de forme circulaire et ayant un rayon associé.

[0025] Selon un autre aspect, l'invention a pour objet un système de lecture d'un composant électronique sans-fil passif du type brièvement décrit ci-dessus, le système comportant un dit composant électronique sans-fil passif et un dispositif d'émission et d'analyse de signaux électromagnétiques, configuré pour transmettre ledit signal électromagnétique incident au composant électronique passif et pour recevoir et analyser le signal électromagnétique rétrodiffusé.

[0026] Ce système de lecture a des avantages analogues à ceux du composant électronique sans-fil passif.

[0027] Selon un mode de réalisation, le dispositif d'émission et d'analyse comporte un module générateur d'un signal électrique et une antenne d'émission et de lecture d'un signal électromagnétique incident, l'antenne d'émission et de lecture étant également adaptée pour recevoir le signal électromagnétique rétrodiffusé par l'antenne du composant électronique passif, le dispositif d'émission et d'analyse comportant en outre un module de traitement de signal, configuré pour analyser les caractéristiques fréquentielles du signal électromagnétique rétrodiffusé.

[0028] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description qui en est donnée ci-dessous, à titre indicatif et nullement limitatif, en référence aux figures annexées, parmi lesquelles :

[Fig 1] la figure 1 est une illustration schématique fonctionnelle d'un système comprenant un composant électronique selon un mode de réalisation ;

[Fig 2] la figure 2 illustre un premier mode de réalisation d'un composant électronique en vue de dessous ;

[Fig 3] la figure 3 représente schématiquement en coupe les composants MEMS dans le premier mode de réalisation ;

[Fig 4] la figure 4 représente un circuit électrique équivalent au composant électronique dans le premier mode de réalisation ;

[Fig 5] la figure 5 illustre schématiquement la variation de la capacité en fonction de la pression d'un capteur MEMS résonant à membrane ;

[Fig 6] la figure 6 illustre des graphes de fonctionnement associés au capteur MEMS résonant à membrane ;

[Fig 7] la figure 7 représente un graphe de variation de la puissance de la modulation du signal rétrodiffusé reçu en fonction des fréquences de résonance propres aux composants MEMS résonants dans le premier mode de réalisation du composant électronique ;

[Fig 8] la figure 8 illustre un deuxième mode de réalisation d'un composant électronique ;

[Fig 9] la figure 9 représente schématiquement en coupe une partie de la figure 8 illustrant un composant MEMS et sa connexion à un élément d'antenne ;

[Fig 10] la figure 10 illustre un troisième mode de réalisation d'un composant électronique.

[0029] La figure 1 illustre schématiquement, par des modules fonctionnels, un système 1 de lecture d'un composant

électronique sans-fil passif selon un mode de réalisation.

[0030] Le système 1 comporte un composant électronique sans-fil passif 2, dont plusieurs modes de réalisation détaillés seront décrits ci-après, et un dispositif 4 d'émission et d'analyse de signaux électromagnétiques associé au composant électronique sans-fil passif.

[0031] Le dispositif 4 comporte un module 6 générateur d'un signal électrique et une antenne 8 d'émission et de lecture.

[0032] Selon une variante non représentée, le dispositif 4 comporte deux antennes distinctes, une antenne d'émission et une antenne de lecture.

[0033] Le signal électrique est transformé en signal électromagnétique incident S_i , également appelé onde électromagnétique incidente, émis par l'antenne 8 d'émission et de lecture. Le signal électromagnétique incident S_i comprend au moins deux fréquences, comme décrit plus en détail ci-après.

[0034] L'antenne 8 d'émission et de lecture est également adaptée pour recevoir un signal électromagnétique S_r rétrodiffusé par l'antenne 14 du composant électronique sans-fil passif 2.

[0035] L'antenne 8 d'émission et de lecture est connectée à un module 10 de traitement de signal, mettant en oeuvre plusieurs fonctionnalités de traitement du signal dont une analyse des caractéristiques fréquentielles du signal électromagnétique rétrodiffusé S_r .

[0036] Le dispositif 4 comporte en outre un module 12 de calcul, qui utilise les caractéristiques fréquentielles obtenues pour fournir un résultat, par exemple une valeur de grandeur physique mesurée ou plusieurs valeurs de grandeurs physiques mesurées.

[0037] Les modules 6, 10, 12 sont des modules électroniques.

[0038] Par exemple le module 12 est un processeur de calcul ou un microcontrôleur.

[0039] Le composant électronique passif 2 est un composant sans-fil comportant au moins une antenne 14, à laquelle sont connectés au moins deux composants microélectromécaniques, appelés ci-après MEMS, qui sont des composants résonants à actionnement non-linéaire ayant chacun une fréquence de résonance mécanique propre.

[0040] Par exemple, les dimensions de l'antenne 14 sont millimétriques, de l'ordre de plusieurs millimètres de longueur et largeur ou diamètre selon la géométrie d'antenne. Les composants MEMS ont des dimensions micro-métriques.

[0041] Pour une même antenne, la fréquence de résonance mécanique d'un des composants MEMS est strictement différente de la fréquence de résonance mécanique d'un autre composant MEMS positionnés sur ladite antenne.

[0042] En d'autres termes, chaque composant MEMS d'une même antenne a une fréquence de résonance mécanique propre, appelée fréquence de résonance propre par la suite, appartenant à une plage de fréquences de résonance, les plages de fréquences de résonance associées à deux composants MEMS distincts étant disjointes.

[0043] On appelle plage de fréquences de résonance associée à un composant MEMS une plage de fréquences, $[f_{\min}, f_{\max}]$, la fréquence de résonance propre f_m appartenant à la plage $[f_{\min}, f_{\max}]$.

[0044] Deux plages de fréquences de résonance respectives, $[f1_{\min}, f1_{\max}]$ et $[f2_{\min}, f2_{\max}]$, sont dites disjointes lorsque la borne de fréquence supérieure la plus petite d'une des plages de fréquences, par exemple $f1_{\max}$, est strictement inférieure à la borne de fréquence inférieure, par exemple $f2_{\min}$, de l'autre plage de fréquences.

[0045] L'antenne 14 est adaptée à fonctionner en réception dans une bande de fréquences dite bande passante d'antenne, $[F_a \pm \Delta]$, où F_a est la fréquence de résonance électrique de l'antenne, dite fréquence d'antenne par la suite.

[0046] Par exemple, l'antenne 14 est adaptée à fonctionner dans une bande de fréquences appartenant à la bande de fréquences comprise entre 300MHz et 3GHz, également appelée bande UHF.

[0047] On entend par composant résonant à actionnement non-linéaire un composant dont la force d'actionnement est proportionnelle à un paramètre électrique (par exemple, un voltage d'actionnement), plus particulièrement proportionnelle à un paramètre électrique au carré. Le composant sera alors actionné aux fréquences intermodulées du signal électrique d'actionnement. Par exemple, si le signal électrique $S_e = A_1 \cos 2\pi f_1 + A_2 \cos 2\pi f_2$, la force d'actionnement

sera proportionnelle à S_e^2 et donc $F_e \propto \frac{A_1 A_2}{2} \cos 2\pi(f_1 + f_2) + \frac{A_1 A_2}{2} \cos 2\pi(f_1 - f_2)$.

[0048] Dans le mode de réalisation illustré à la figure 1, le composant électronique sans-fil passif 2 comporte une antenne 14, à laquelle sont connectés un premier composant MEMS résonant à actionnement non-linéaire 16 et un deuxième composant MEMS résonant à actionnement non-linéaire 18.

[0049] Dans un mode de réalisation, les composants MEMS 16 et 18 sont placés sur l'antenne 14, chacun étant connecté à l'antenne 14 en un point de contact.

[0050] Selon un mode de réalisation, chacun des composants MEMS résonants 16, 18 est connecté à l'antenne 14 en un même point de contact.

[0051] Selon un autre mode de réalisation, chacun des composants MEMS résonants 16, 18 est connecté à l'antenne 14 en un point de contact distinct.

[0052] Les composants MEMS résonants 16, 18 sont connectés en parallèle ou en série.

[0053] Dans un mode de réalisation, l'antenne est réalisée sur un substrat sous forme de circuit imprimé, et chaque composant MEMS est réalisé sur une puce en silicium, les composants MEMS étant connectés à l'antenne au moyen

de connexions de pontage filaire ou « wire bonding » en anglais.

[0054] Dans un mode de réalisation alternatif, l'antenne 14 et les composants MEMS connectés sont réalisés sur un même substrat en silicium.

[0055] Dans l'exemple de la figure 2, le composant électronique sans-fil passif 2 comporte une antenne 14.

[0056] Dans un mode de réalisation alternatif, le composant électronique sans-fil passif 2 comporte un nombre N d'antennes, N étant supérieur ou égal à deux, comportant chacune au moins deux composants microélectromécaniques, MEMS, résonants à actionnement non-linéaire, chaque antenne ayant une fréquence d'antenne qui lui est propre et qui est différente de la fréquence d'antenne de chacune des N-1 autres antennes.

[0057] Plus généralement, chaque antenne comporte un nombre P de composants MEMS résonants à actionnement non-linéaire, P étant supérieur ou égal à 2.

[0058] Dans un mode de réalisation, chacun des composants MEMS 16, 18 est un résonateur capacitif.

[0059] Dans un mode de réalisation, au moins un des composants MEMS résonants est un capteur MEMS résonant dont la fréquence de résonance mécanique varie en fonction d'une grandeur physique prédéterminée, par exemple un capteur MEMS capacitif.

[0060] Par exemple, la grandeur physique est la température, la pression d'air ou de gaz, l'humidité.

[0061] Dans le système de lecture d'un composant électronique sans-fil passif 2, le signal électromagnétique incident S_i comporte au moins deux fréquences proches, respectivement une première fréquence f_e et une deuxième fréquence $f_e + f_m$, ces deux fréquences étant dans la bande passante de l'antenne 14. En ajustant la deuxième fréquence par rapport à la première fréquence, l'un ou l'autre des composants MEMS résonants 16, 18 de l'antenne est mis en résonance, cette résonance modulant en amplitude le signal électromagnétique S_r rétrodiffusé par l'antenne.

[0062] En étudiant, par balayage d'un ensemble de fréquences f_m , les caractéristiques spectrales du signal électromagnétique rétrodiffusé, il est déterminé pour quelle deuxième fréquence $f_e + f_m$ du signal électromagnétique incident S_i l'amplitude de la modulation du signal électromagnétique rétrodiffusé S_r varie le plus. Ainsi, le dispositif 4 détecte la fréquence de résonance à laquelle un des composants MEMS résonants de l'antenne mis en résonance.

[0063] Les plages des fréquences de résonance des composants MEMS du composant électronique étant disjointes, la lecture permet à la fois de distinguer quel composant MEMS résonant de l'antenne 14 est en résonance et de détecter sa fréquence de résonance.

[0064] Lorsque le composant MEMS résonant est un capteur MEMS résonant, par exemple capacitif, dont la fréquence de résonance mécanique varie avec une grandeur physique donnée, une valeur de la grandeur physique considérée en est déduite par le module 12 de calcul.

[0065] Ainsi, avantageusement, dans un mode de réalisation, le composant électronique sans-fil passif 2 comprend une pluralité de capteurs MEMS capacitifs distincts, les différents capteurs ayant chacun une fréquence de résonance mécanique variant avec une grandeur physique distincte. Cela permet de réaliser la mesure d'une pluralité de valeurs de grandeurs physiques distinctes, tout en limitant l'encombrement du composant 2.

[0066] Un premier mode de réalisation d'un composant électronique 20 est décrit en référence aux figures 2 et 3.

[0067] La figure 2 représente une vue, dite vue du dessous, du composant 20, ce composant comportant une antenne plane 14 comportant deux boucles rayonnantes imbriquées 22, 24, et un ensemble 30 de composants MEMS.

[0068] L'antenne 14 est par exemple réalisée sous forme de piste conductrice imprimée sur un substrat 15, par exemple par une technologie de fabrication PCB.

[0069] L'ensemble 30 comporte, dans cet exemple, deux composants MEMS 26, 28, qui sont par exemple des capteurs MEMS capacitifs du type à membrane circulaire, connectés en parallèle et représentés schématiquement dans la figure 3.

[0070] Comme illustré à la figure 3, chaque capteur MEMS 26, 28 est placé sur un substrat 33 en silicium, et est connecté à la boucle rayonnante 24 via des pistes conductrices 32, 34, et des fils de pontage 35 (wire bonding).

[0071] A titre d'exemple non limitatif, l'ensemble 30 est formé sur un substrat 33, de forme parallélépipédique, de base rectangulaire de dimensions millimétriques, par exemple 1,1 mm de largeur et 1,7 mm de longueur.

[0072] Dans ce mode de réalisation, chacun des deux capteurs MEMS 26, 28 est composé d'une membrane circulaire en silicium, séparée d'une électrode fixe par une cavité sous vide d'épaisseur g_0 donnée, de préférence comprise entre 1 et 7 micromètres (μm), par exemple égale à 2,5 μm .

[0073] Dans cet exemple, le composant électronique réalise une fonctionnalité de capteur de pression, le premier capteur MEMS 26 étant un capteur configuré pour mesurer la pression, le deuxième capteur MEMS 28 étant un capteur de référence, permettant d'affiner la mesure de pression en fonction de la température. Les deux capteurs MEMS 26, 28, appelés simplement capteurs 26, 28 ci-après, forment une paire composée d'un capteur de mesure et d'un capteur de référence.

[0074] Le premier capteur 26 est un capteur de pression capacitif, sensible en outre à la température.

[0075] Le deuxième capteur 28 du mode de réalisation de la figure 2 est un capteur dit de référence, du même type que le premier capteur 26, mais dont la fréquence de résonance mécanique ne varie pas en fonction de la pression.

[0076] Par exemple dans un mode de réalisation, la membrane de ce deuxième capteur 28 est trouée, ce qui la rend insensible à la pression. Les autres caractéristiques du deuxième capteur, par exemple la surface de la membrane et

le matériau dans lequel la membrane est réalisée, sont identiques aux caractéristiques du premier capteur.

[0077] Un circuit électrique équivalent du composant électronique formant un système antenne-capteurs de la figure 2 est illustré à la figure 4.

[0078] Le fonctionnement électrique de l'antenne est considéré équivalent à un circuit RCL série, les valeurs respectives de résistance R, de capacité C et d'inductance L étant dépendantes des caractéristiques électromagnétiques de l'antenne.

[0079] Le premier capteur 26 a une capacité $C_1(P,T)$ qui varie en fonction de la pression et de la température, et le deuxième capteur 28 a une capacité $C_2(T)$ qui varie en fonction de la température.

[0080] Les figures 5 et 6 illustrent le fonctionnement d'un capteur MEMS de pression à membrane, par exemple du premier capteur 26, pour une température T donnée.

[0081] Le fonctionnement d'un capteur de pression à membrane est illustré schématiquement à la figure 5, pour une température donnée.

[0082] La membrane 23 est assimilée à un composant capacitif de capacité C_0 formée entre deux électrodes 25 et 27 lorsque la membrane 23 est au repos, la membrane 23 étant placée sur une cavité 38, vide ou remplie d'air.

[0083] La pression extérieure (pression de l'environnement du capteur), schématisée par des flèches 29 à la figure 4, fait défléchir la membrane et modifie la capacité C(P), où $C(0)=C_0$, entre les deux électrodes 25 et 27.

[0084] Des graphes de fonctionnement associés, dans un exemple de fonctionnement, sont illustrés à la figure 6.

[0085] A une température T donnée, la fréquence de résonance du premier capteur 26 évolue en fonction de la pression, entre 0 bar et 1 bar.

[0086] Un exemple d'évolution est illustré dans le graphe G1 de la figure 6, dans lequel l'axe des abscisses représente la pression, avec une variation entre 0 bar et 1 bar, et l'axe des ordonnées la fréquence de résonance de la membrane, entre 1,810 MHz et 1,820 MHz.

[0087] Le graphe G2 de la figure 6 illustre l'évolution de la capacité C(P) en fonction du temps, l'axe des abscisses du graphe G2 représentant le temps entre 0 et 2,5 μ s, l'axe des ordonnées la capacité C(P) en picroFarads. L'évolution de la capacité est sinusoïdale en réponse au signal électromagnétique incident S_i .

[0088] La variation de la capacité se traduit par une variation du signal électromagnétique rétrodiffusé au cours du temps, permettant de détecter la fréquence de résonance de la membrane du capteur.

[0089] Dans le mode de réalisation de la figure 2, les vibrations du deuxième capteur 28 sont indépendantes de la pression, mais dépendantes de la température.

[0090] La fréquence de résonance du deuxième capteur 28 est une fréquence de résonance de référence f_{ref} dépendante de la température T :

$$f_{ref}(T) = f_c(0, T)$$

[0091] Où T désigne la température, et f_c est la fréquence de résonance du premier capteur 26, dépendante de la pression et de la température. En d'autres termes, la fréquence de résonance du deuxième capteur est égale à la fréquence de résonance du premier capteur à pression égale à 0 bar et à même température.

[0092] Dans un exemple d'application, la température donnée est la température ambiante, par exemple $T_0=20$ °C. Par exemple, la fréquence de résonance de l'antenne est de $F_a=868$ MHz.

[0093] Par exemple, la première fréquence de résonance f_c du premier capteur 26 varie dans la plage de fréquences de résonance 1,81 à 1,82 MHz et la deuxième fréquence de résonance du deuxième capteur 28 varie dans la plage de fréquences de résonance 1,02 à 1,07 MHz.

[0094] Dans cet exemple, le système antenne-capteurs est conçu de manière à ce que à 868 MHz, et à pression égale à zéro bar, la puissance du signal électromagnétique rétrodiffusé envoyé par l'antenne est maximale.

[0095] Dans un mode de réalisation, le dispositif 4 d'émission et d'analyse de signaux électromagnétiques envoie un signal électromagnétique S_i de fréquence 868 MHz, modulé en amplitude avec une fréquence de modulation f_m variant dans la plage de fréquences $[f_c(0, T); f_c(1, T)]$.

[0096] La plage de fréquences $[F_a + f_c(0, T); F_a + f_c(1, T)]$ est comprise dans la bande passante de l'antenne.

[0097] Pour chacun des capteurs, la force électrique créée dans la capacité est proportionnelle à la tension aux bornes du capteur au carré.

[0098] Lorsque la fréquence de modulation f_m est égale à la fréquence de résonance mécanique d'un des capteurs, la force générée est de la forme :

$$F_e(t) = \frac{C_0}{2(g_0 - w(r))^2} V_0^2 \left[\frac{2 + M^2}{4} + M \sin(2\pi f_m t) - \frac{M^2}{4} \cos(4\pi f_m t) \right]$$

[0099] Où C_0 est la capacité à zéro bar, g_0 est l'épaisseur de la cavité, $w(r)$ est la déflexion d'un point r du rayon de la membrane due à la pression, V_0 est la tension au entre les bornes du circuit électrique équivalent à zéro bar, et M est l'indice de modulation du signal S_i .

[0100] En faisant varier la fréquence f_m sur la plage de fréquences $[f_c(0, T); f_c(1, T)]$, on obtient un maximum de la variation de puissance du signal rétrodiffusé à deux valeurs de fréquence distinctes, correspondant aux fréquences de résonance respectives, i.e. la première fréquence de résonance $F_1 = f_c(P, T)$ du premier capteur de pression et la deuxième fréquence de résonance $F_2 = f_{ref}(0, T)$ du deuxième capteur (capteur de référence).

[0101] La variation de la puissance du signal électromagnétique rétrodiffusé S_r en fonction de la fréquence est illustrée dans le graphe G_3 de la figure 7, dans laquelle l'axe des ordonnées représente la puissance du signal électromagnétique rétrodiffusé et l'axe des abscisses la fréquence.

[0102] Dans l'exemple de la figure 7 ; la fréquence de résonance du deuxième capteur (fréquence de résonance de référence) F_2 est inférieure à la première fréquence de résonance F_1 du premier capteur de pression.

[0103] La deuxième fréquence de résonance (ou fréquence de résonance de référence) fournit une information sur la température de l'environnement dans lequel est placé le composant électronique.

[0104] La prise en compte conjointe de la première fréquence de résonance du premier capteur et de la fréquence de résonance de référence permet d'obtenir une évaluation plus précise de la pression, en tenant compte de la température.

[0105] Par exemple, le capteur de référence est caractérisé au préalable en température, et l'évolution de sa fréquence de résonance mécanique en fonction de la température est mémorisée.

[0106] De plus, avantageusement, deux mesures de grandeurs physiques sont obtenues, une mesure de température et une mesure de pression.

[0107] La figure 8 illustre un deuxième mode de réalisation d'un composant électronique 40, dans lequel le composant électronique comporte trois composants MEMS résonants à actionnement non linéaire, et plus particulièrement trois capteurs MEMS capacitifs du type à membrane circulaire.

[0108] De manière analogue à la figure 2, la figure 8 illustre une vue schématique du dessous du composant électronique 40.

[0109] Dans ce deuxième mode de réalisation, le composant électronique 40 comprend une antenne planaire 14 comportant trois boucles imbriquées.

[0110] Le composant 40 comporte trois boucles d'antenne, 42, 44, 46, chacune comportant un composant MEMS 48, 50, 52, les composants MEMS étant par exemple des capteurs MEMS capacitifs.

[0111] Par exemple, le composant 40 comporte un premier capteur MEMS capacitif 48 de mesure de l'humidité, un deuxième capteur MEMS capacitif 50 de mesure de la température, et un troisième capteur MEMS capacitif 52 de mesure de la pression.

[0112] Dans ce deuxième mode de réalisation, chaque capteur MEMS capacitif est connecté en un point de contact distinct à l'antenne 14, sur une boucle d'antenne distincte.

[0113] Chacun des capteurs MEMS capacitifs est connecté, dans un mode de réalisation, de manière analogue de la manière à la connexion illustrée en figure 3.

[0114] La figure 9 illustre la connexion du capteur MEMS 48 à la boucle d'antenne 42 dans le mode de réalisation de la figure 8, la connexion des autres capteurs MEMS 50, 52 aux autres boucles d'antennes étant analogue.

[0115] Un composant MEMS 48, sur un substrat 54, est connecté à un élément d'antenne 42 via des pistes conductrices 56, et des fils 58 de pontage filaire (« wire bonding » en anglais).

[0116] Selon une variante, les premier, deuxième et troisième capteurs MEMS capacitifs 48, 50, 52 sont par exemple connectés en parallèle ou en série en un même point de contact de l'antenne 14.

[0117] De manière analogue, chacun de ces capteurs MEMS capacitifs a une fréquence de résonance propre, appartenant à une plage de fréquences de résonance propre, les plages de fréquences de résonance de trois capteurs étant disjointes.

[0118] Ainsi, trois grandeurs physiques distinctes sont mesurables, en appliquant le procédé de mesure décrit ci-dessus en référence à la figure 2, par exemple la température, l'humidité et la pression.

[0119] Bien entendu, la température, l'humidité et la pression sont des exemples de grandeurs physiques mesurables, l'invention s'appliquant de manière analogue pour la mesure d'autres grandeurs physiques.

[0120] Dans un mode de réalisation, l'antenne 14 est réalisée par impression sur un substrat via une technologie de fabrication de circuit imprimé, et chaque composant MEMS est réalisé sur un substrat en silicium.

[0121] Dans un autre mode de réalisation, l'antenne 14 et la pluralité de capteurs MEMS capacitifs sont implantés sur un même substrat, par exemple un substrat en silicium, en utilisant des technologies de fabrication de microsystèmes. La connexion entre chaque capteur MEMS capacitif et l'antenne est alors réalisée avec des pistes conductrices.

[0122] La figure 10 illustre un exemple d'un troisième mode de réalisation d'un composant électronique sans-fil passif 60, illustré dans une vue « du dessus ».

[0123] Dans ce mode de réalisation, dit à réseau d'antennes, le composant électronique comporte N antennes, $N=4$

dans l'exemple illustré, référencées 62_1 , 62_2 , 62_3 , 62_4 , la référence générique 62_i étant utilisée pour indiquer l'une quelconque de ces antennes.

[0124] Chaque antenne 62_i comportant deux boucles imbriquées 64_i , 66_i , et deux composants MEMS résonants distincts, respectivement 68_i , 70_i , chaque composant MEMS respectif étant connecté à l'une des boucles d'antenne et ayant une fréquence de résonance propre, appartenant à une plage de fréquences de résonance, les plages de fréquences de résonance étant disjointes pour deux composants MEMS résonants distincts 68_i , 70_i .

[0125] Dans ce troisième mode de réalisation chaque antenne 62_i a une fréquence d'antenne Fa_i propre, les fréquences de résonance de deux antennes distinctes étant strictement différentes.

[0126] Dans ce cas, la lecture, par exemple la détection de la mise en résonance d'un composant MEMS résonant 64_i , 66_i donné se fait en utilisant la fréquence de résonance de l'antenne Fa_i et sa fréquence de résonance propre $F1_i$, $F2_i$.

[0127] Les fréquences d'antenne Fa_i étant toutes distinctes, il est possible de prévoir, dans une variante, des composants MEMS résonants de mêmes fréquences de résonance associé à des antennes distinctes, i.e. $F1_i = F1_j$ et $F2_i = F2_j$ pour i différente de j .

[0128] Ce troisième mode de réalisation est particulièrement adapté, en utilisant des capteurs MEMS résonants, pour l'étude des variations localisées des mêmes grandeurs physiques sur une surface.

[0129] Dans une variante, les composants MEMS résonants du troisième mode de réalisation sont des résonateurs MEMS à actionnement capacitif, la mise en résonance d'un de ces résonateurs permettant d'identifier l'antenne associée.

[0130] Les modes de réalisation de l'invention donnés à titre d'exemple ci-dessus comportent une antenne planaire à boucles imbriquées.

[0131] En variante, d'autres types d'antenne sont utilisables, en particulier des antennes planaires ayant une géométrie différente, par exemple patch ou dipôle, ou une antenne non planaire, par exemple une antenne cornet.

[0132] L'invention a été décrite avec des composants MEMS résonants du type à membrane vibrante. En variante, d'autres types de composants MEMS résonants sont utilisables, par exemple à poutre vibrante.

[0133] Ainsi, selon une variante, des composants MEMS résonants de diverses géométries, par exemple à membrane vibrante et à poutre vibrante, sont intégrés sur une même antenne.

[0134] Selon une autre variante, la non-linéarité de vibration du composant MEMS est obtenue par un composant extérieur, par exemple une diode.

[0135] Avantageusement, un composant électronique selon l'invention est télé-alimenté et présente un encombrement réduit, tout en permettant la mesure de plusieurs grandeurs physiques et/ou une amélioration de la précision de la mesure d'une ou plusieurs des grandeurs physiques mesurées.

Revendications

1. Composant électronique sans-fil passif comportant au moins une antenne, la ou chaque antenne ayant une fréquence d'antenne associée, et comprenant au moins un composant microélectromécanique résonant, ayant une fréquence de résonance et connecté à un point de contact de ladite antenne, formant un ensemble antenne-résonateur adapté à recevoir un signal électromagnétique incident comportant au moins deux fréquences et à émettre un signal électromagnétique rétrodiffusé, **caractérisé en ce que** la ou chaque antenne (14 , 62_1 , ..., 62_4) comporte au moins deux composants microélectromécaniques (16 , 18 , 26 , $28,48$, 50 , 52 , 68_1-68_4 , 70_1-70_4), MEMS, résonants à actionnement non-linéaire, chacun desdits composants MEMS ayant une fréquence de résonance mécanique propre appartenant à une plage de fréquences de résonance, les plages de fréquences de résonance associées à deux composants MEMS distincts étant disjointes.
2. Composant selon la revendication 1, comportant un nombre N d'antennes, N étant supérieur ou égal à deux, chaque antenne comportant au moins deux composants microélectromécaniques, MEMS, résonants à actionnement non-linéaire, chaque antenne ayant une fréquence d'antenne propre, les fréquences d'antenne de deux antennes distinctes étant différentes.
3. Composant selon la revendication 1 ou 2, dans lequel au moins un desdits au moins deux composants MEMS résonants est un résonateur capacitif.
4. Composant selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel au moins un desdits au moins deux composants MEMS résonants est un capteur MEMS résonant dont la fréquence de résonance varie en fonction d'une grandeur physique prédéterminée.
5. Composant selon la revendication 4, dans lequel ladite grandeur physique prédéterminée est une grandeur physique

caractéristique d'un environnement du capteur MEMS résonant parmi la température, la pression d'air ou de gaz, l'humidité.

- 5 6. Composant selon l'une quelconque des revendications 4 ou 5, comportant une pluralité de capteurs MEMS résonants, chacun desdits capteurs MEMS résonants ayant une fréquence de résonance variant en fonction d'une grandeur physique distincte, ledit composant électronique passif étant adapté à fournir des mesures d'une pluralité de grandeurs physiques distinctes.
- 10 7. Composant selon l'une quelconque des revendications 4 à 6, comportant au moins une paire d'un premier et d'un deuxième composants MEMS résonants, le premier composant MEMS étant un capteur MEMS résonant dont la fréquence de résonance varie en fonction d'une première grandeur physique à mesurer et en fonction d'au moins une deuxième grandeur physique, le deuxième composant MEMS de ladite paire étant un capteur MEMS résonant dont la fréquence de résonance ne varie pas en fonction de ladite première grandeur physique, la fréquence de résonance du deuxième capteur variant en fonction de ladite au moins une deuxième grandeur physique.
- 15 8. Composant selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel lesdits au moins deux composants MEMS résonants sont connectés en série ou en parallèle.
- 20 9. Composant selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel ladite au moins une antenne est réalisée sous forme de circuit imprimé sur un substrat, et lesdits composant MEMS sont réalisées sur une ou plusieurs puces en silicium, chaque composant MEMS étant relié à un élément d'antenne par pontage filaire.
- 25 10. Composant selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel ladite antenne et lesdits au moins deux composants MEMS résonants sont implantés sur un même substrat en silicium.
- 30 11. Composant selon la revendication 9 ou 10, dans lequel chaque composant MEMS résonant est formé par une membrane positionnée entre deux électrodes, de forme circulaire et ayant un rayon associé.
- 35 12. Système de lecture d'un composant électronique passif, comportant un composant électronique passif conforme aux revendications 1 à 11 et un dispositif d'émission et d'analyse (4) de signaux électromagnétiques, configuré pour transmettre ledit signal électromagnétique incident au composant électronique passif et pour recevoir et analyser le signal électromagnétique rétrodiffusé.
- 40 13. Système selon la revendication 12, dans lequel ledit dispositif d'émission et d'analyse (4) comporte un module (6) générateur d'un signal électrique et une antenne (8) d'émission et de lecture d'un signal électromagnétique incident (S_i), l'antenne (8) d'émission et de lecture étant également adaptée pour recevoir le signal électromagnétique (S_r) rétrodiffusé par l'antenne (14) du composant électronique passif (2, 20, 40, 60), le dispositif (4) d'émission et d'analyse comportant en outre un module (10) de traitement de signal, configuré pour analyser les caractéristiques fréquentielles du signal électromagnétique rétrodiffusé (S_r).

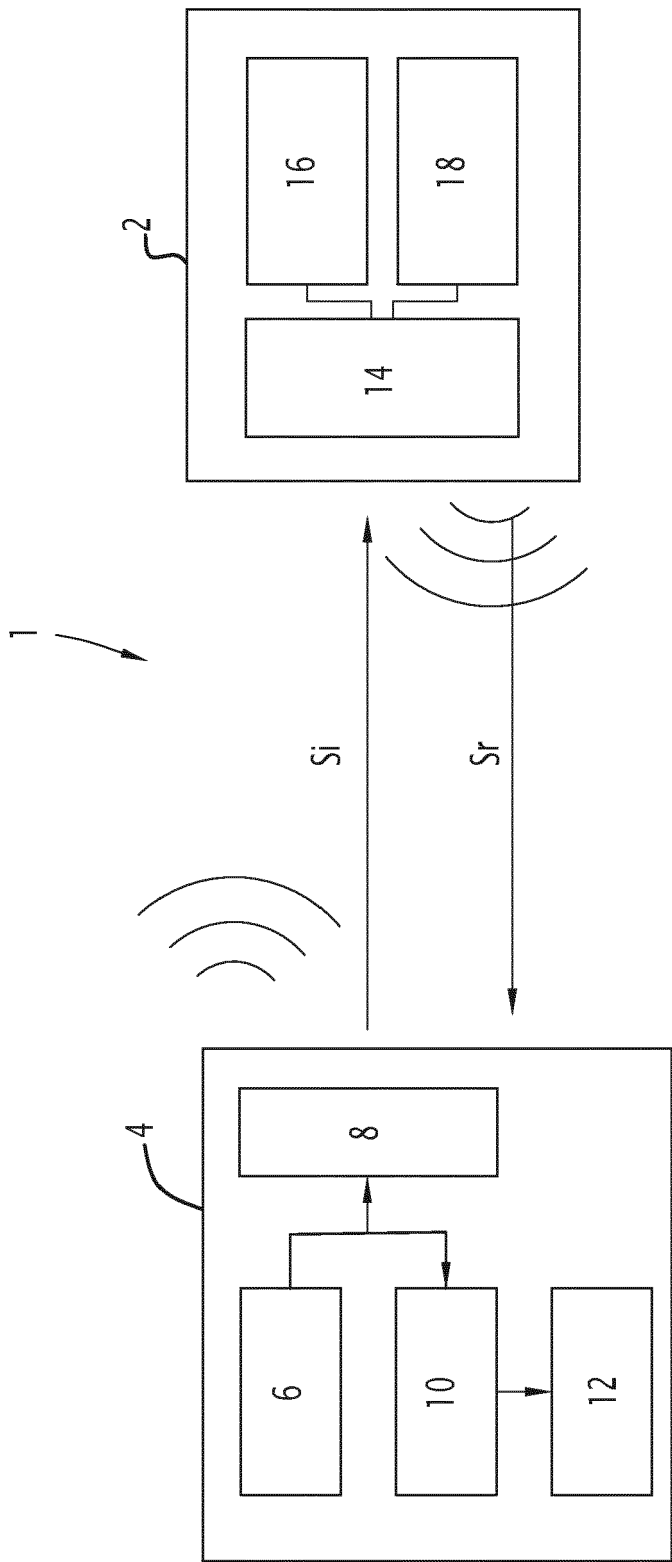


FIG.1

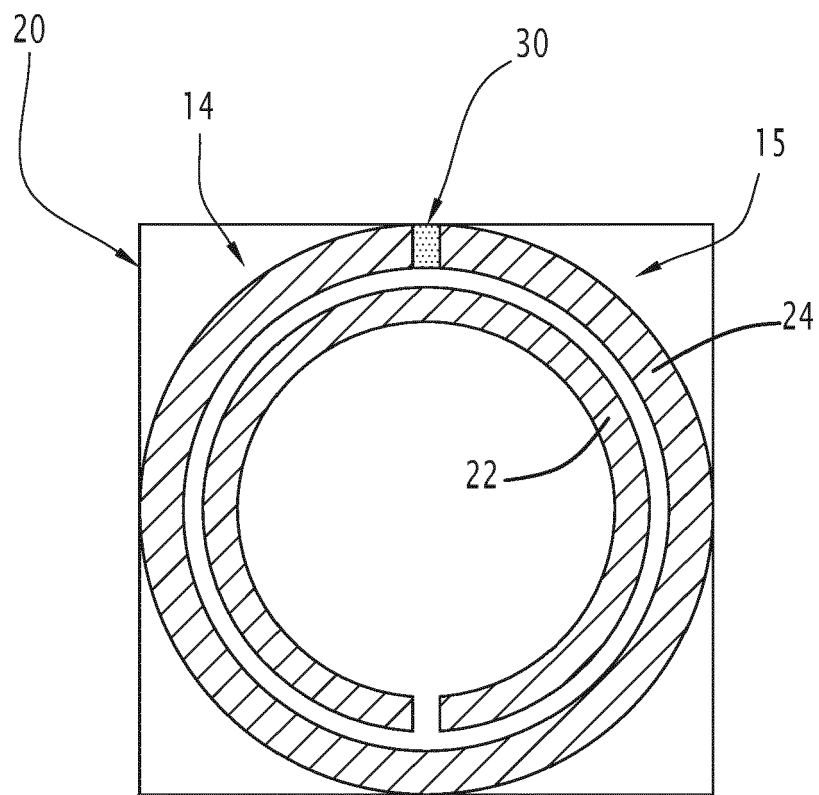


FIG.2

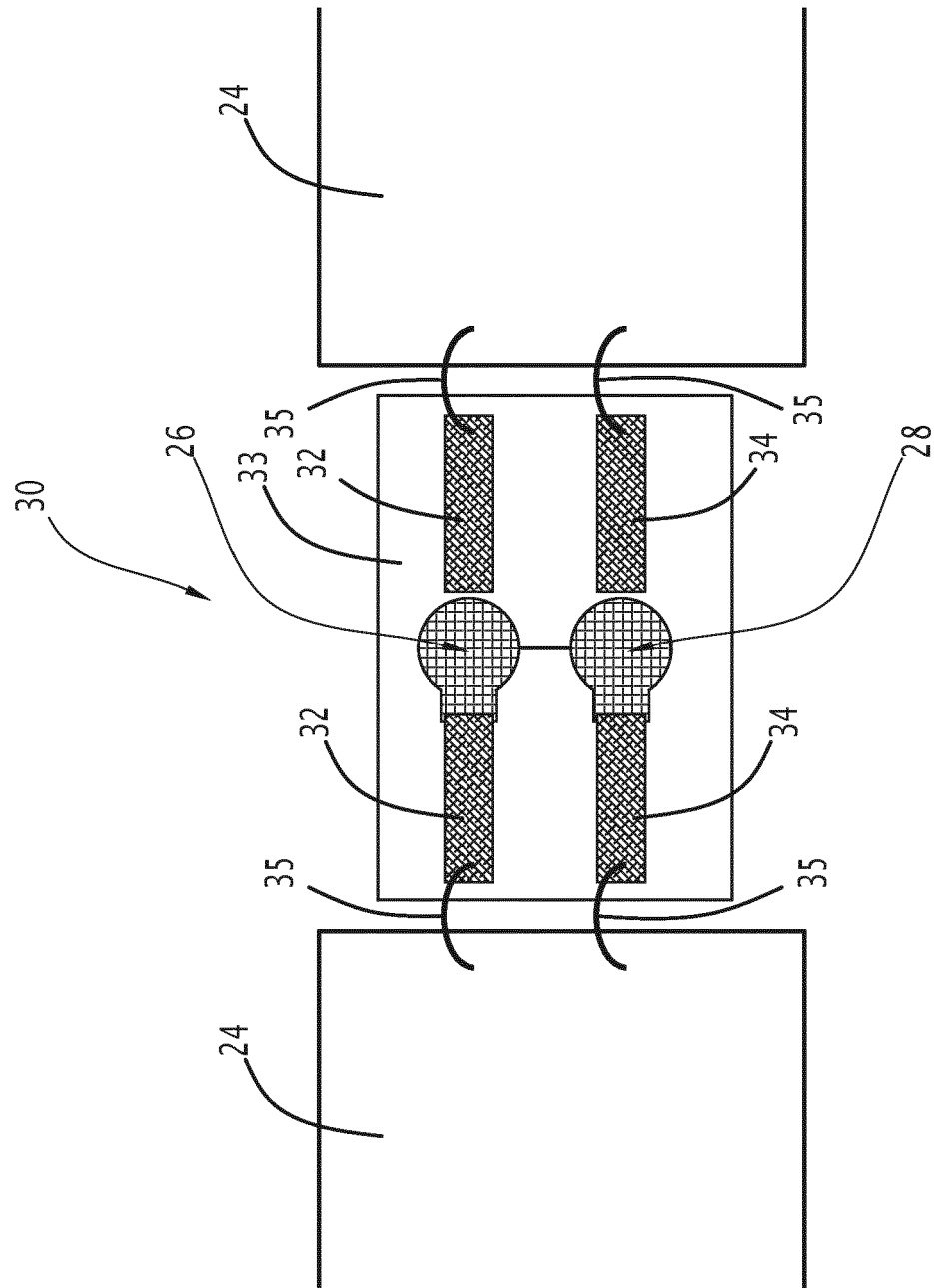
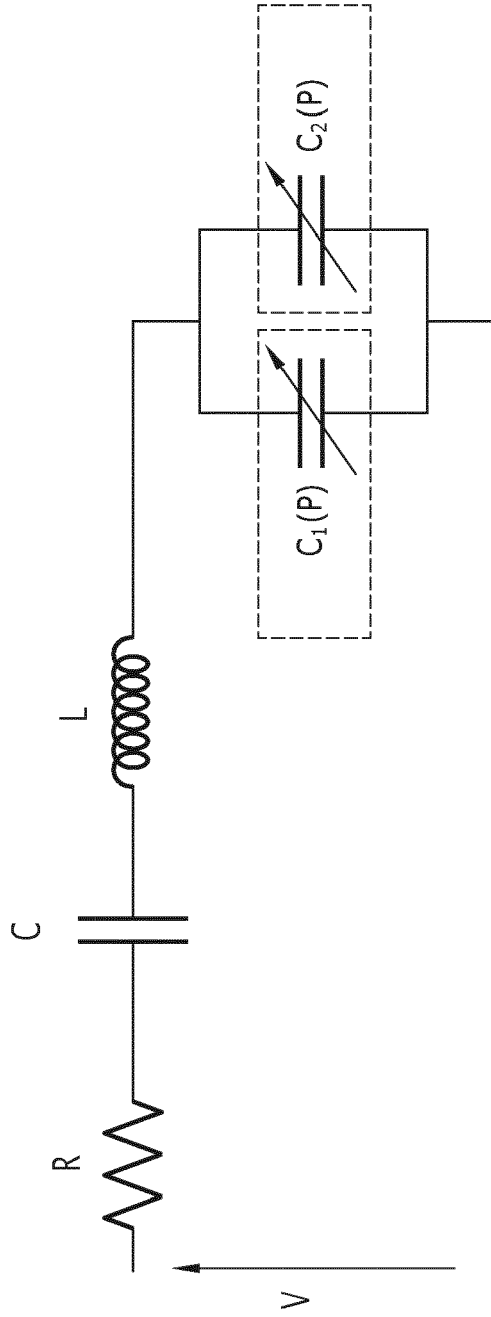


FIG. 3

**FIG.4**

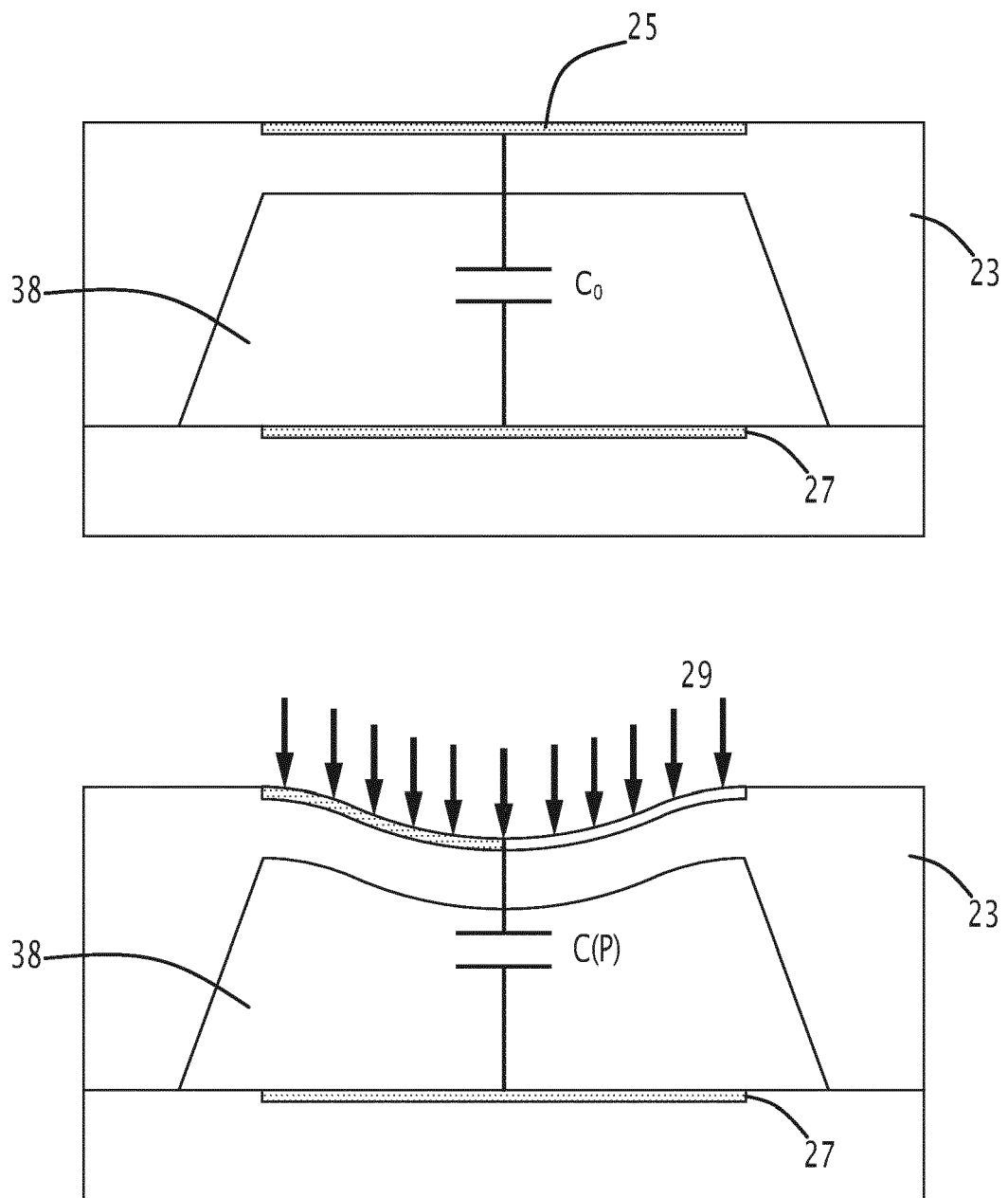


FIG.5

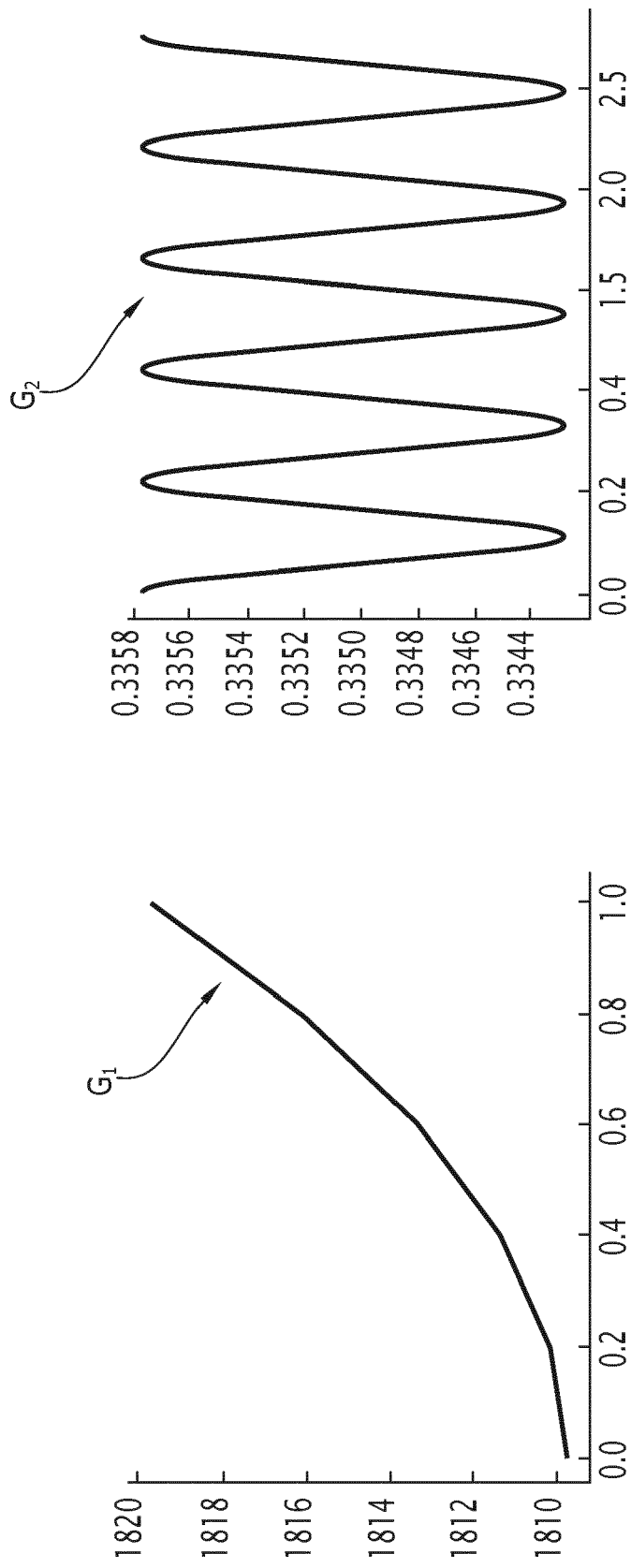


FIG.6

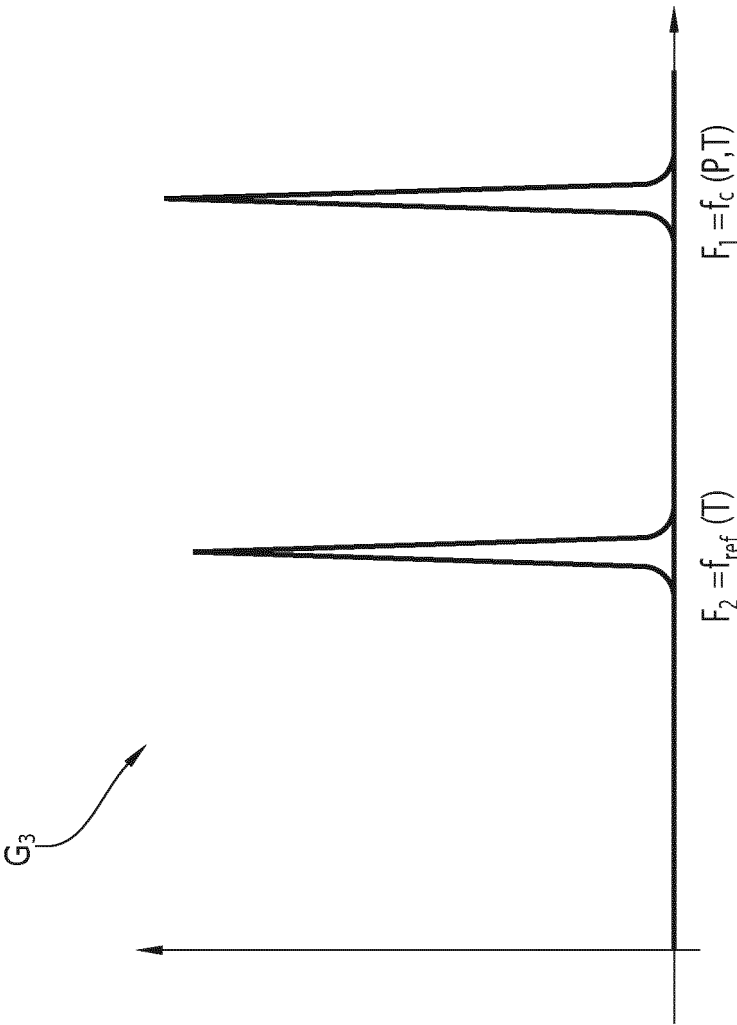


FIG.7

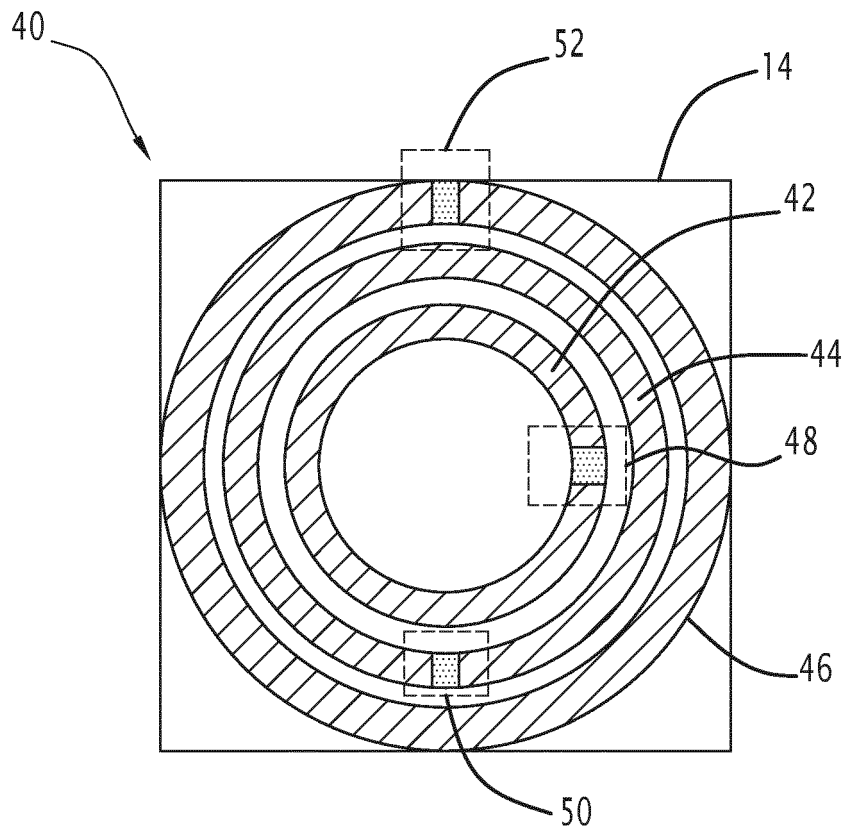


FIG.8

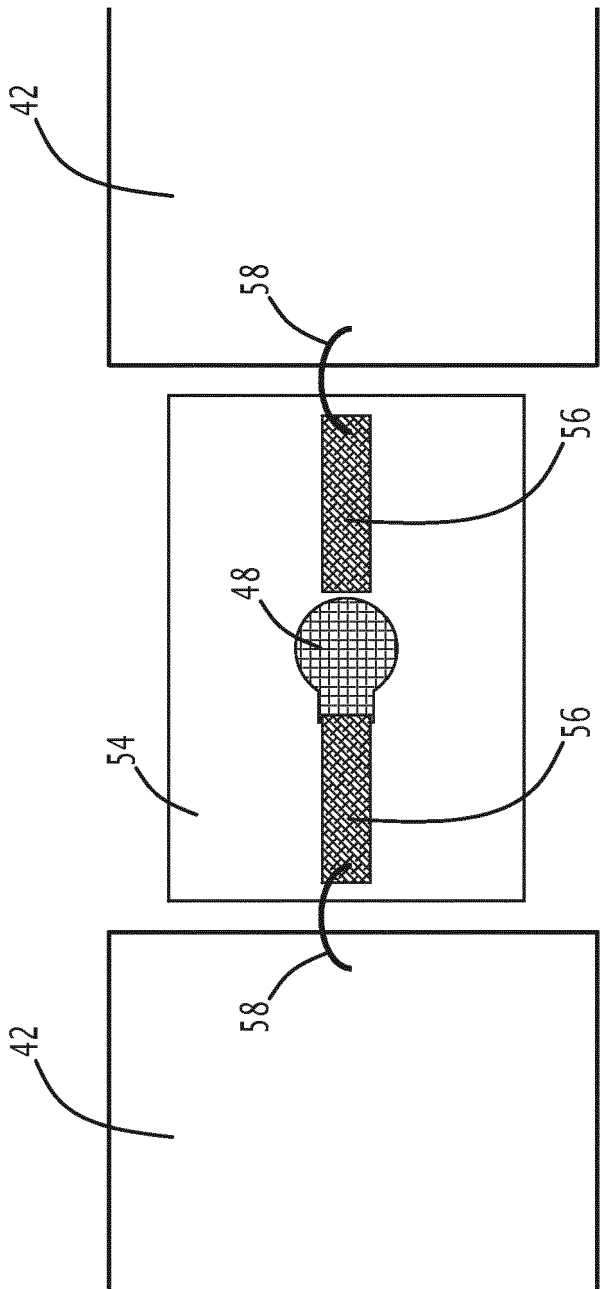


FIG. 9

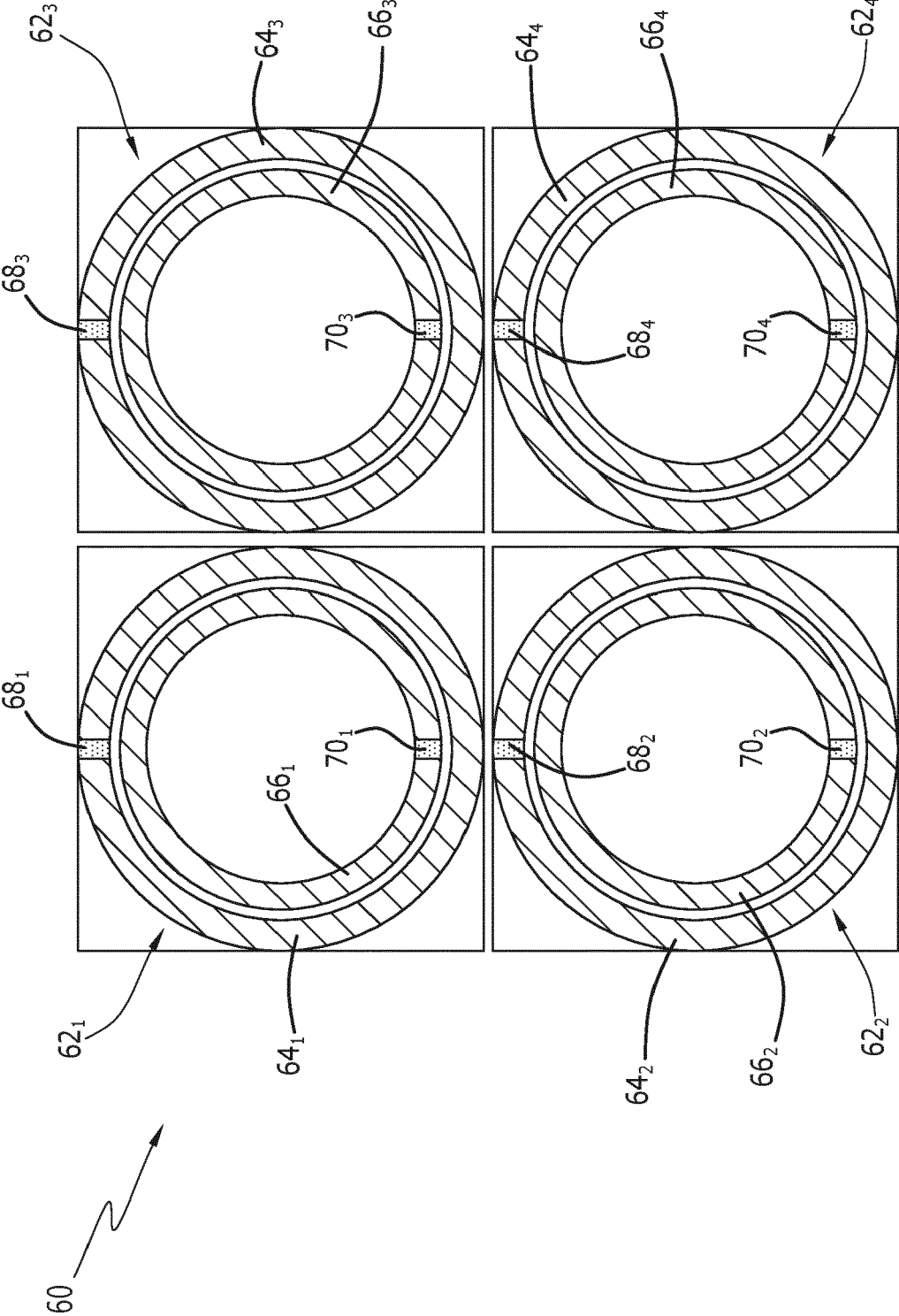


FIG. 10



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 23 18 4170

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

2

EPO FORM 1503 03.82 (P04-C02)

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
X	US 2016/211826 A1 (ABDOLVAND REZA [US] ET AL) 21 juillet 2016 (2016-07-21)	1,3-9, 12,13	INV. H01Q1/22
A	* alinéa [0023] - alinéa [0055]; figures 1-9E *	2,10,11	H01Q5/40 H01Q7/00 H01Q23/00

X	US 2013/336095 A1 (SEPPA HEIKKI [FI] ET AL) 19 décembre 2013 (2013-12-19)	1,3-9, 12,13	
A	* alinéa [0095] - alinéa [0167]; figures 1-12 *	2,10,11	

X	US 6 667 725 B1 (SIMONS RAINEE N [US] ET AL) 23 décembre 2003 (2003-12-23)	1,3-8, 10,11	
A	* colonne 2 - colonne 5 *	2,9,12, 13	

A	ALCESILAS ROMAIN ET AL: "Design of a MEMS-Based Fully Passive Wireless Pressure Sensor for Harsh Environments", 2022 SMART SYSTEMS INTEGRATION (SSI), IEEE, 27 avril 2022 (2022-04-27), pages 1-4, XP034202043, DOI: 10.1109/SSI56489.2022.9901429 * le document en entier *	1-13	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
			H01Q H03H
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche La Haye		Date d'achèvement de la recherche 1 novembre 2023	Examineur Keyrouz, Shady
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
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			

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 23 18 4170

5 La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

01-11-2023

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2016211826 A1	21-07-2016	US 2016211826 A1	21-07-2016
		WO 2016115071 A1	21-07-2016

US 2013336095 A1	19-12-2013	EP 2656506 A1	30-10-2013
		FI 20106349 A	21-06-2012
		US 2013336095 A1	19-12-2013
		WO 2012085333 A1	28-06-2012

US 6667725 B1	23-12-2003	AUCUN	

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- EP 2478636 B1 [0010]