

(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 2014/053575 A1**

(43) Date de la publication internationale  
10 avril 2014 (10.04.2014)

WIPO | PCT

- (51) Classification internationale des brevets :  
*G01N 30/64* (2006.01)    *H03H 3/007* (2006.01)  
*B81B 7/04* (2006.01)    *H03H 9/02* (2006.01)  
*G01L 1/18* (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/EP2013/070594
- (22) Date de dépôt international :  
2 octobre 2013 (02.10.2013)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :  
1259339    2 octobre 2012 (02.10.2012)    FR
- (71) Déposants : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES [FR/FR]; 25 rue Leblanc, Bâtiment Le Ponant D, F-75015 Paris (FR). ANALYTICAL PIXELS TECHNOLOGY - APIX TECHNOLOGY [FR/FR]; 7 parvis Louis Néel, Bâtiment 52, F-38000 Grenoble (FR).
- (72) Inventeurs : ANDREUCCI, Philippe; 4 lotissement le Verger, Rue de Stalingrad, F-38430 Moirans (FR). BARRATTIN, Régis; 2 Rue du Commandant Rozan, F-38000 Grenoble (FR). COLINET, Eric; 163 rue Herzog, F-76230 Bois Guillaume (FR). DURAFFOURG, Laurent; 25 rue de Maubec, Le Clos de Maubec, F-38500 Voiron (FR). PUGET, Pierre; 54 Chemin du Bois, F-30330 Saint Ismier (FR).
- (74) Mandataire : REGIMBEAU; 20 rue de Chazelles, F-75847 Paris Cedex 17 (FR).
- (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, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, 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.
- (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, 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, 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))

(54) Title : MEASUREMENT SYSTEM INCLUDING A NETWORK OF NANOELECTROMECHANICAL SYSTEM RESONATORS

(54) Titre : SYSTEME DE MESURE COMPRENANT UN RESEAU DE RESONATEURS DE TYPE NANO-SYSTEME ELECTROMECHANIQUE

(57) Abstract : The invention relates to a measurement system including a network of nanoelectromechanical system (NEMS) resonators, characterized in that: each one of said resonators includes: an electrostatic activation device capable of generating a vibration of a beam exposed to said excitation signal, at least one piezoresistive stress gauge made of a doped semiconducting material, extending from the beam so as to detect a movement of said beam, the variation in the electrical resistance of said at least one gauge supplying an output signal; said network includes at least two groups of resonators, each group including at least two resonators having an identical empty resonance frequency, each group of resonators having an empty resonance frequency different from that of each other group; the resonators forming each group are connected in parallel; the groups of resonators forming said network are connected in parallel; said system includes a reading device designed to supply an excitation signal at the network input and to determine the resonance frequency of a group of resonators which is selected by injecting, into said excitation signal, a frequency component corresponding to the empty resonance frequency of each selected group of resonators, and by identifying, in the output signal of the network, a resonance frequency component of the selected group of resonators.

(57) Abrégé : L'invention concerne un système de mesure comprenant un réseau de résonateurs de type nano-système électromécanique (NEMS), caractérisé en ce que : • chacun desdits résonateurs comprend : - un dispositif d'actionnement électrostatique apte à générer une vibration d'une poutre sous l'effet dudit signal d'excitation, - au moins une jauge de contrainte piézorésistive en matériau semi-conducteur dopé, s'étendant à partir de la poutre de sorte à détecter un déplacement de ladite poutre, la variation de résistance électrique de ladite au moins une jauge fournissant un signal de sortie, • ledit réseau comprend au moins deux groupes de résonateurs, chaque groupe comprenant au moins deux résonateurs présentant une fréquence de résonance à vide identique, chaque groupe de résonateurs présentant une fréquence de résonance à vide différente de celle de chaque autre groupe, • les résonateurs formant chaque groupe sont connectés en parallèle, • les groupes de résonateurs formant ledit réseau sont connectés en parallèle, • ledit système comprend un dispositif de lecture conçu pour fournir un signal d'excitation à l'entrée du réseau et pour déterminer la fréquence de résonance

[Suite sur la page suivante]

WO 2014/053575 A1

---

d'un groupe de résonateurs sélectionné en injectant dans ledit signal d'excitation une composante fréquentielle correspondant à la fréquence de résonance à vide de chaque groupe de résonateurs sélectionné et en identifiant, dans le signal de sortie du réseau, une composante fréquentielle de résonance du groupe de résonateurs sélectionné.

## SYSTEME DE MESURE COMPRENANT UN RESEAU DE RESONATEURS DE TYPE NANO-SYSTEME ELECTROMECHANIQUE

### DOMAINE DE L'INVENTION

5 La présente invention concerne un système de mesure comprenant un réseau de résonateurs de type nano-système électromécanique (NEMS).

### ARRIERE PLAN DE L'INVENTION

10 Les résonateurs de type nano-système électromécanique (généralement désignés par l'acronyme NEMS, du terme anglo-saxon « Nano Electro Mechanical System ») sont des dispositifs prometteurs notamment dans le domaine de l'analyse de gaz.

Le principe de détection d'une espèce contenue dans un échantillon dudit gaz repose sur l'actionnement, par un signal d'excitation (mécanique ou électrique), une poutre suspendue de dimensions nanométriques à sa fréquence de résonance, et la  
15 détection du déplacement de ladite poutre au moyen d'au moins une jauge de contrainte.

La poutre étant fonctionnalisée par une substance chimique déterminée, le passage d'un échantillon de gaz dans un canal fluide dans lequel est placé le résonateur permet la capture (par exemple par adsorption) par ladite substance de molécules d'une espèce contenue dans l'échantillon.

20 La capture d'au moins une molécule a pour effet de modifier la fréquence de résonance de la poutre, qui est détectable dans le signal de sortie (généralement électrique) de la jauge de contrainte.

Le résonateur est connecté à un circuit électronique de lecture, qui permet d'une part l'actionnement de la poutre en vibration par le signal d'excitation et d'autre part la  
25 lecture du signal de sortie émis par la jauge de contrainte.

Différentes structures de résonateurs ont déjà été conçues, comprenant différents types de poutres (encastrée-libre, encastrée-encastrée,...), des moyens d'actionnement divers (incluant des moyens d'actionnement thermoélastique, électrostatique...) et des techniques de détection variées (incluant des moyens piézorésistifs, piézoélectriques...).

30 De tels résonateurs peuvent être fabriqués sur des substrats de silicium au moyen des techniques habituelles de la micro-électronique, incluant des procédés de gravure, de dépôt, etc.

Cependant, en raison de leur taille nanométrique, les résonateurs NEMS sont relativement fragiles (notamment en termes de chocs mécaniques et électriques).

35 Par ailleurs, leur faible surface rend difficile la capture d'espèces contenues dans des concentrations très faibles dans les échantillons à analyser.

Pour pallier ces limitations, il peut être avantageux d'utiliser simultanément plusieurs résonateurs de ce type, agencés en réseau.

Les avantages attendus d'un réseau de résonateurs NEMS sont multiples.

D'une part, ils offrent une surface totale pour la capture des espèces à analyser qui est d'autant plus grande que le nombre de poutres est élevé.

5 Ceci permet de détecter plus finement des espèces contenues en faible concentration dans l'échantillon gazeux à analyser.

Par ailleurs, l'utilisation d'un réseau de résonateurs NEMS permet de minimiser l'impact de la défaillance de l'un d'entre eux, qui est compensée par le fonctionnement des autres résonateurs du réseau, améliorant ainsi la robustesse du dispositif.

10 En outre, pour un réseau de N résonateurs NEMS, on devrait atteindre, en théorie, un gain en limite de détection de l'ordre de  $\sqrt{N}$  en termes de signal (ou de l'ordre de N en termes de puissance).

La limite de détection peut être estimée par le calcul de la variance d'Allan, qui exprime la résolution de mesure en fréquence (rapport  $df/f$ ) en fonction du temps de mesure (également désigné par le terme « temps d'intégration »).

15 L'obtention d'un tel gain de  $\sqrt{N}$  peut être désignée par le terme d'« effet réseau ».

Cependant, la réalisation d'un réseau de résonateurs NEMS se heurte à différentes difficultés technologiques, de sorte qu'il n'a pas encore été possible, à ce jour, de fabriquer de réseau permettant d'obtenir l'effet réseau attendu.

20 Ainsi, l'article de Bargatin et al. [Bargatin2012] décrit un réseau de 2800 résonateurs NEMS connectés en série et en parallèle, dans lequel chaque résonateur comprend une poutre en silicium encastrée-libre associée à une jauge de contrainte piézorésistive constituée d'une couche métallique déposée sur la poutre, la poutre étant actionnée thermoélastiquement de sorte à vibrer hors du plan du substrat dans lequel elle est fabriquée.

25 L'actionnement thermoélastique repose sur l'application au résonateur d'une tension alternative à une fréquence engendrant des variations de température de la poutre à sa fréquence de résonance.

30 Pour s'affranchir du bruit de fond, les auteurs ont mis en œuvre une mesure différentielle consistant à connecter deux réseaux identiques à la même entrée de l'électronique de lecture, mais en appliquant un déphasage de  $180^\circ$  au signal envoyé à l'un des réseaux par rapport à l'autre, et en sommant les signaux de sortie de chacun des réseaux.

Cet article met cependant en évidence des résultats décevants en termes de limite de détection, notamment pour des temps d'intégration longs, c'est-à-dire supérieurs à 100  
35 ms.

Ainsi, une limite de détection comparable à celle d'un résonateur individuel a été constatée pour des temps d'intégration de l'ordre de quelques secondes.

D'après les auteurs de l'article, ces résultats semblent s'expliquer par des problèmes de dispersion des fréquences de résonance entre résonateurs.

En effet, l'effet réseau mentionné plus haut ne peut être obtenu que dans des conditions idéales, comprenant notamment l'hypothèse que les résonateurs du réseau  
5 sont parfaitement identiques les uns aux autres.

En pratique, ces conditions sont difficiles à atteindre dans la mesure où, notamment, les dispersions de fabrication d'un résonateur à l'autre sont inévitables.

Ainsi, [Bargatin2012] indique que le réseau utilisé dans l'expérience présente des dispersions des fréquences de résonance, imputables aux dispersions de fabrication, de  
10 l'ordre de 1%.

Il en résulte que les résonateurs dont la réponse est trop différente de celle des autres résonateurs du réseau ne participent pas à la mesure, de sorte que, bien que la limite de détection puisse être diminuée, l'effet réseau ne peut être atteint.

L'article de Mile et al. [Mile2010] présente un exemple d'un résonateur NEMS  
15 différent de ceux employés dans [Bargatin2012].

Ce résonateur comprend une poutre suspendue encastrée-libre, de part et d'autre de laquelle s'étendent deux jauges de contrainte piézorésistives en silicium dopé.

L'actionnement de la poutre est réalisé de manière électrostatique, par deux électrodes disposées de part et d'autre de la poutre, conduisant à une vibration de la  
20 poutre dans le plan du substrat dans lequel elle est fabriquée.

Cependant, bien que ce type de résonateur, qui n'a été testé qu'individuellement, paraisse prometteur en termes de rapport signal sur bruit, la variance d'Allan mesurée reste inexplicablement plus élevée que la variance théorique en raison d'un bruit inconnu dont la nature n'a pas été identifiée à ce jour.

Or, l'existence de ce bruit non identifié est susceptible d'empêcher l'obtention d'un  
25 effet réseau si l'on tentait d'associer lesdits résonateurs en réseau.

En effet, si ce bruit est extrinsèque aux résonateurs, ou qu'il est intrinsèque aux résonateurs mais corrélé d'un résonateur à l'autre, un effet réseau ne peut être obtenu.

Il reste donc à remédier à ces phénomènes pour pouvoir réaliser un réseau de  
30 résonateurs permettant effectivement d'obtenir l'effet réseau recherché.

Par ailleurs, seul un adressage collectif des résonateurs est proposé dans [Bargatin2012], c'est-à-dire que l'ensemble des résonateurs est relié à une même entrée et une même sortie, de sorte qu'il n'est pas possible de lire le signal de sortie de chaque résonateur.

En d'autres termes, le signal de sortie du réseau correspond à la moyenne des signaux des différents résonateurs.

Or, il peut être intéressant d'adresser les résonateurs individuellement, c'est-à-dire de lire le signal de sortie de chaque résonateur.

Cependant, un résonateur NEMS présente au moins deux, voire quatre plots d'interconnexion avec son électronique de lecture. Ainsi, pour des résonateurs du type décrit dans [Mile2010], lorsque l'on découple le mode d'actionnement et le mode de détection, c'est-à-dire que l'on emploie des moyens différents pour actionner la poutre  
5 d'une part et détecter son déplacement d'autre part, au moins deux plots sont nécessaires à la connexion du résonateur à un circuit d'actionnement et au moins deux autres plots sont nécessaires à la connexion à un circuit de détection.

Par conséquent, un adressage individuel des résonateurs supposerait de multiplier ce nombre de plots d'interconnexion par le nombre de résonateurs, ce qui, pour un  
10 nombre élevé de résonateurs, est techniquement impossible compte tenu des contraintes relatives à la taille globale des dispositifs.

Un but de l'invention est donc de concevoir un système de mesure comprenant des résonateurs NEMS présentant des performances améliorées en termes de limite de détection et bénéficiant autant que possible de l'effet réseau attendu.

15 Un autre but de l'invention est de concevoir un système de mesure susceptible d'être fabriqué selon un procédé peu complexe et permettant l'obtention d'un système de faibles dimensions.

### BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

20 Conformément à l'invention, il est proposé un système de mesure comprenant un réseau de résonateurs de type nano-système électromécanique (NEMS), caractérisé en ce que :

- chacun desdits résonateurs comprend :
  - une entrée pour recevoir un signal d'excitation et une sortie pour fournir un signal  
25 de sortie en réponse audit signal d'excitation, ledit signal de sortie présentant une résonance à la fréquence de résonance du résonateur,
  - une poutre suspendue par rapport à un support, la fréquence de résonance à vide du résonateur correspondant à la fréquence de résonance à vide de ladite poutre,
  - un dispositif d'actionnement électrostatique apte à générer une vibration de ladite  
30 poutre sous l'effet dudit signal d'excitation,
  - au moins une jauge de contrainte piézorésistive en matériau semi-conducteur dopé, suspendue par rapport audit support et s'étendant à partir de la poutre de sorte à détecter un déplacement de ladite poutre, la variation de résistance électrique de ladite au moins une jauge fournissant ledit signal de sortie,
- 35 • ledit réseau comprend au moins deux groupes de résonateurs, chaque groupe comprenant au moins deux résonateurs présentant une fréquence de résonance à vide identique, chaque groupe de résonateurs présentant une fréquence de résonance à vide différente de celle de chaque autre groupe,

- le système comprend une mémoire dans laquelle est enregistrée une information relative à la fréquence de résonance à vide de chaque résonateur ou groupe de résonateurs,
- les résonateurs formant chaque groupe sont connectés en parallèle, chaque groupe  
5 comprenant une entrée et une sortie connectées respectivement à l'entrée et à la sortie de chacun desdits résonateurs,
- les groupes de résonateurs formant ledit réseau sont connectés en parallèle, ledit réseau comprenant une entrée et une sortie connectées respectivement à l'entrée et à la sortie de chacun desdits groupes de résonateurs,
- 10 • ledit système comprend un dispositif de lecture conçu pour fournir un signal d'excitation à l'entrée du réseau et pour déterminer la fréquence de résonance d'un groupe de résonateurs sélectionné en injectant dans ledit signal d'excitation une composante fréquentielle correspondant à la fréquence de résonance à vide mémorisée pour chaque groupe de résonateurs sélectionné et en identifiant, dans le  
15 signal de sortie du réseau, une composante fréquentielle de résonance du groupe de résonateurs sélectionné.

Par « réseau », on entend dans le présent texte un agencement dense d'au moins deux groupes de résonateurs NEMS connectés en parallèle.

Par « dense », on entend une densité d'au moins 100 résonateurs / mm<sup>2</sup>, de  
20 préférence supérieure ou égale à 1000 résonateurs / mm<sup>2</sup>.

De la sorte, tous les résonateurs du réseau sont soumis simultanément au même environnement et en particulier au même échantillon de gaz à analyser.

A cet égard, on notera que le document WO 2011/154363 dans lequel est décrit l'agencement d'une pluralité de résonateurs NEMS (désigné par le terme « network »), ne  
25 porte pas sur un réseau au sens de la présente invention.

En effet, contrairement à la présente invention, qui veille à mettre en contact tous les résonateurs d'un réseau en contact avec le même échantillon à analyser, le document précité vise à distribuer temporellement et spatialement l'échantillon gazeux à analyser par la pluralité de résonateurs.

30 Ledit système peut comprendre un dispositif de sommation des signaux de sortie de chaque groupe de résonateurs du réseau en un signal total de sortie du réseau et le dispositif de lecture est conçu pour déterminer la fréquence de résonance d'un groupe de résonateurs à partir dudit signal total de sortie du réseau.

De manière avantageuse, ledit dispositif de lecture comprend un circuit à boucle de  
35 phase asservie (PLL) conçu pour caler une fréquence du signal d'excitation sur la fréquence d'un pic de résonance du signal de sortie du réseau et pour fournir, en tant que fréquence de résonance d'excitation, la fréquence calée.

Selon un mode de réalisation, chaque groupe de résonateurs est fonctionnalisé avec une espèce chimique différente.

Selon une forme d'agencement du réseau, les résonateurs du réseau sont agencés sur un même support de sorte à former des lignes et des colonnes de résonateurs s'étendant parallèlement les uns aux autres, les poutres des résonateurs étant parallèles les unes aux autres.

Selon une autre forme d'agencement, les résonateurs du réseau sont agencés sur un même support de sorte à former des lignes et des colonnes de résonateurs s'étendant parallèlement les uns aux autres, lesdits résonateurs étant en outre agencés de sorte que, sur une même ligne parallèle aux poutres des résonateurs, deux résonateurs adjacents soient symétriques par rapport à un plan parallèle à une colonne.

De préférence, le système comprend au moins un canal fluïdique destiné à l'écoulement d'un échantillon gazeux à analyser, ledit réseau de résonateurs étant agencé dans ledit canal fluïdique de sorte que les poutres desdits résonateurs soient exposées audit échantillon.

Le système peut par ailleurs comprendre au moins deux réseaux de résonateurs dans ledit canal fluïdique.

Selon une forme d'exécution avantageuse, le système comprend au moins un résonateur dit de référence agencé hors du canal fluïdique tout en étant soumis aux mêmes fluctuations externes, et connecté au même dispositif de lecture que le réseau agencé dans le canal fluïdique ; le système comprend en outre un système de traitement configuré pour combiner le signal de sortie dudit résonateur de référence avec les signaux de sortie des groupes de résonateurs du réseau.

Selon une autre forme d'exécution avantageuse, le système comprend au moins un résonateur dit de référence configuré pour être moins sensible à l'échantillon gazeux que les autres groupes de résonateurs et en ce que le système comprend un système de traitement configuré pour combiner le signal de sortie dudit résonateur de référence avec les signaux de sortie des groupes de résonateurs du réseau.

Le système peut également comprendre un système de traitement configuré pour combiner les signaux de sortie de chaque groupe de résonateurs du réseau avec une moyenne desdits signaux.

Par ailleurs, le système peut comprendre une colonne de chromatographie en phase gazeuse contenant ledit canal fluïdique.

De manière avantageuse, le canal de ladite colonne de chromatographie comprend une pluralité de réseaux de résonateurs distribués régulièrement entre l'entrée et la sortie de ladite colonne.

De manière alternative, le système peut comprendre une colonne de chromatographie en phase gazeuse en amont dudit canal fluide dans la direction d'écoulement de l'échantillon gazeux.

Un autre aspect de l'invention se rapporte à un procédé de lecture d'un système tel que décrit ci-dessus, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes consistant à :

- sélectionner, parmi les groupes de résonateurs du réseau, un groupe de résonateurs à lire,
- récupérer dans la mémoire l'information de résonance à vide de chaque groupe de résonateurs sélectionné,
- appliquer un signal d'excitation au réseau comprenant une composante fréquentielle correspondant à la fréquence de résonance à vide de chaque groupe de résonateurs sélectionné,
- déterminer la fréquence de résonance de chaque groupe de résonateurs sélectionné en identifiant, dans le signal de sortie du réseau, une composante fréquentielle de résonance de chaque groupe de résonateurs sélectionné.

Ainsi, de préférence, l'application dudit signal d'excitation génère dans le signal de sortie une composante fréquentielle principale correspondant à la résonance de chaque groupe de résonateurs sélectionné, et l'on détermine la fréquence de résonance de chaque groupe de résonateurs sélectionné en extrayant ladite composante fréquentielle du signal de sortie du réseau.

Un autre aspect de l'invention concerne un procédé de fabrication d'un système tel que décrit plus haut, caractérisé en ce qu'il comprend la fabrication collective, sur un support en un matériau semi-conducteur, des résonateurs formant ledit réseau en mettant en œuvre des techniques de microélectronique.

De manière avantageuse, ledit procédé comprend la fonctionnalisation collective des groupes de résonateurs dudit réseau par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ou dépôt physique en phase vapeur (PVD) d'espèces chimiques différentes pour chacun desdits groupes.

### 30 BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description détaillée qui va suivre, en référence aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est un schéma en vue de dessus d'un mode de réalisation d'un résonateur NEMS faisant partie d'un système selon l'invention ;
- la figure 2 est une représentation schématique de la variance d'Allan pour un résonateur individuel et pour un réseau de résonateurs selon l'art antérieur ;
- la figure 3A est un schéma en vue de dessus d'un premier exemple d'agencement dense de résonateurs NEMS en réseau ;

- la figure 3B est un schéma en vue de dessus d'un deuxième exemple d'agencement de résonateurs NEMS en réseau, procurant une densité plus grande par rapport à celle de l'exemple de la figure 3A ;
- la figure 4 est un schéma en vue de dessus de la connexion des différents résonateurs du réseau ;
- la figure 5 illustre de manière schématique en vue de dessus l'agencement d'un réseau constitué de 5 groupes de résonateurs dans un canal fluïdique ;
- la figure 6 est un schéma de l'architecture électronique de lecture d'un tel réseau ;
- la figure 7 présente la variance d'Allan mesurée pour un réseau de 4 résonateurs ;
- la figure 8 présente la densité spectrale de puissance des signaux de chacun des résonateurs et d'un signal reconstruit par fusion desdits signaux ;
- la figure 9 présente la variance d'Allan des signaux de chacun des résonateurs et du signal reconstruit par fusion desdits signaux ;
- la figure 10 présente la variance d'Allan mesurée pour un réseau de 45 résonateurs, et pour un signal reconstruit à partir desdits signaux ;
- la figure 11 présente la variance d'Allan mesurée pour un réseau de 16 résonateurs, et pour un signal reconstruit à partir desdits signaux,
- la figure 12 présente la variance d'Allan mesurée pour un groupe de 75 résonateurs et pour un résonateur unitaire,
- les figures 13A et 13B présentent des signaux de détection de pics de toluène mesurés respectivement par un résonateur unitaire et par un groupe de 75 résonateurs ; la figure 13C présentant la superposition de ces deux signaux.

25

## DESCRIPTION DETAILLÉE DE MODES DE RÉALISATION DE L'INVENTION

On va décrire successivement les différents éléments du système, puis l'on décrira le fonctionnement dudit système.

### Description d'un mode de réalisation d'un résonateur

30 La figure 1 présente en vue de dessus un résonateur selon un mode de réalisation de l'invention.

Ledit résonateur 1 est formé sur un substrat support 2.

Le résonateur comprend une poutre 3 de longueur L et de largeur w.

35 La poutre 3 est suspendue par rapport au substrat support 2, à l'exception d'un encastrement de l'une de ses extrémités 31 dans une partie 2' du substrat, en saillie par rapport au plan du substrat 2 qui s'étend sous la poutre 3.

De manière connue en elle-même, une telle poutre peut être formée par gravure du substrat 2.

L'autre extrémité 32 de la poutre est quant à elle libre.

De part et d'autre de la poutre 3 s'étendent deux jauges de contrainte piézorésistives 4, 4', qui sont également suspendues par rapport au substrat 2.

Avantageusement, lesdites jauges 4, 4' sont, comme la poutre, gravées dans le substrat 2 et présentent au moins un plan en commun avec la poutre 3.

Ces jauges sont en matériau semi-conducteur dopé, présentant de préférence une concentration en dopants supérieure à  $10^{19}$  atomes/cm<sup>3</sup> et présentent une section s.

Selon un mode de réalisation donné à titre indicatif, la largeur d'une jauge est de 100 nm, son épaisseur de 160 nm et sa longueur de 500 nm.

De préférence, ledit matériau semi-conducteur dopé est du silicium dopé.

L'intersection entre chacune des jauges 4, 4' et la poutre 3 se trouve à une distance  $l_1$  de la région 31 d'encastrement de la poutre, choisie pour maximiser la contrainte exercée sur la jauge lors de la déflexion de la poutre.

Chacune des jauges 4, 4' est reliée à une électrode 5, 5', lesdites électrodes permettant l'application respectivement de potentiels constants de signes opposés.

Dans d'autres modes de réalisation du résonateur, il est possible de n'employer qu'une jauge de contrainte en matériau semi-conducteur dopé.

Le résonateur 1 comprend en outre un dispositif d'actionnement électrostatique de la poutre qui, comme représenté ici, peut comprendre deux électrodes 6, 6' s'étendant dans le plan même plan que la poutre et sont disposées de part et d'autre de celle-ci, à une distance g.

Les électrodes 6, 6' sont destinées à recevoir respectivement un signal électrique d'excitation et un signal de signe opposé, et constituent donc deux entrées du résonateur.

Sous l'application d'un signal électrique présentant une fréquence correspondant à la fréquence de résonance à vide de la poutre 3, la poutre est entraînée en vibration dans un plan parallèle au substrat 2.

Par fréquence de résonance à vide de la poutre, on entend la fréquence de résonance de la poutre en l'absence de l'échantillon de gaz à analyser.

Selon une forme d'exécution, la mesure de la variation de résistance électrique des jauges piézorésistives est effectuée entre l'extrémité encastree 31 de la poutre et la jonction entre la poutre et les jauges 4, 4'.

Le signal de sortie du résonateur est ainsi fourni à une électrode 7 de connexion située au niveau de l'extrémité encastree 31 de la poutre, en vue de la lecture dudit signal.

Cette méthode de mesure n'est cependant pas exclusive et le signal de sortie peut être fourni par d'autres moyens ; par exemple, il est possible d'appliquer une tension de polarisation au niveau de l'électrode 7 et de mesurer la tension aux bornes de l'ensemble des deux jauges 4,4' pour en déduire la variation de leur résistance électrique

L'homme du métier pourra donc ajuster la conception de la polarisation de la(les) jauge(s) de contrainte et de la mesure de leur réponse sans pour autant sortir du cadre de la présente invention.

5 A titre purement indicatif, les dimensions de la poutre d'un tel résonateur sont de l'ordre de quelques micromètres en longueur, de quelques centaines de nanomètres en largeur, et d'une centaine de nanomètres d'épaisseur.

Ainsi, selon un mode de réalisation donné à titre d'exemple, la poutre présente une longueur de 3 à 4  $\mu\text{m}$ , une largeur de 300 nm et 160 nm d'épaisseur.

10 On pourra également se référer aux documents [Mile2010] et EP 2 008 965, qui décrivent un tel résonateur.

Cependant, cette forme de réalisation du résonateur n'est pas limitative et l'on trouvera dans les documents WO 2012/034990 et WO 2012/034951 d'autres exemples de résonateurs susceptibles d'être mis en œuvre dans un système selon l'invention, présentant notamment différents modes d'encastrement de la poutre.

15 Tous ces modes de réalisation des résonateurs ont en commun au moins les caractéristiques suivantes :

- une entrée pour recevoir un signal d'excitation et une sortie pour fournir un signal de sortie en réponse audit signal d'excitation, ledit signal de sortie présentant une résonance à la fréquence de résonance du résonateur,
- 20 - une poutre suspendue par rapport à un support, la fréquence de résonance à vide du résonateur étant définie comme étant la fréquence de résonance à vide de ladite poutre,
- un dispositif d'actionnement électrostatique apte à générer une vibration de ladite poutre sous l'effet dudit signal d'excitation,
- 25 - au moins une jauge de contrainte piézorésistive en matériau semi-conducteur dopé, suspendue par rapport audit support et s'étendant à partir de la poutre de sorte à détecter un déplacement de ladite poutre, la variation de résistance électrique de ladite au moins une jauge fournissant ledit signal de sortie.

De tels résonateurs présentent en effet les avantages suivants.

30 D'une part, l'utilisation d'une force électrostatique permet de réduire de manière substantielle la puissance nécessaire pour actionner un résonateur (qui est de l'ordre d'1 microwatt ou moins), ce qui réduit les contraintes sur l'électronique d'interface.

A titre de comparaison, on peut estimer à 1 milliwatt la puissance nécessaire pour actionner un résonateur de manière thermoélastique, comme dans [Bargatin2012].

35 A cet égard, les inventeurs ont identifié comme une des causes possibles des performances décevantes du réseau décrit dans ce document la nécessité d'une électronique d'interface très complexe et susceptible de ne pas être capable de délivrer la puissance requise pour l'ensemble des résonateurs du réseau.

De ce fait, ces résonateurs semblent ne pas avoir été actionnés de manière suffisante pour que leur signal électrique de sortie soit nettement supérieur au bruit de l'électronique de lecture.

Par conséquent, la source de bruit prédominante semble donc être le bruit en  $1/f$  de l'électronique de lecture, qui est externe au réseau de résonateurs.

La figure 2 illustre de manière schématique la variance d'Allan pour un résonateur NEMS individuel (courbe (a)) et pour un réseau de résonateurs NEMS tel que décrit dans [Bargatin2012] (courbe (b)).

Sur ce graphe, l'axe des abscisses représente le temps  $t$  d'intégration et l'axe des ordonnées la résolution de mesure en fréquence, définie par le rapport  $df/f$ .

La durée de 100 ms correspond à une limite entre le bruit blanc (pour lequel l'augmentation du temps d'intégration améliore la résolution) et le bruit en  $1/f$  (pour lequel l'augmentation du temps d'intégration n'a pas d'effet sur la résolution) pour un résonateur individuel.

La comparaison des courbes (a) et (b) montre que la mise en réseau des résonateurs NEMS a un effet sur le bruit blanc des résonateurs, qui est décorrélié d'un résonateur à l'autre, puisqu'elle permet d'améliorer la résolution de mesure pour les faibles temps d'intégration.

En revanche, on n'observe pas d'effet réseau pour les temps d'intégration élevés qui correspondent au bruit en  $1/f$ , qui est généré, comme mentionné ci-dessus, par l'électronique de lecture.

Un autre avantage des résonateurs mis en œuvre dans l'invention est qu'ils peuvent être fabriqués sur un substrat semi-conducteur, par exemple de silicium, en mettant en œuvre des techniques bien maîtrisées dans le domaine de la microélectronique, comprenant principalement de la photolithographie et de la gravure.

On s'affranchit ainsi du procédé de métallisation (du type « sputtering ») qui est mis en œuvre pour la fabrication des jauges métalliques dans [Bargatin2012], qui est responsable de dispersions de fabrication.

On peut donc obtenir des dispersions de fabrication plus faibles, ce qui est un facteur d'obtention de l'effet réseau attendu.

Par ailleurs, le découplage de l'actionnement et de la détection permet de réduire de manière significative le signal de fond, au contraire des résonateurs métalliques décrits dans [Bargatin2012], dans lesquels la même résistance est utilisée pour actionner et détecter.

En effet, dans ces résonateurs métalliques, la variation de résistance électrique de la jauge métallique résulte d'une part de la déformation de la jauge (c'est-à-dire l'information recherchée) et de son auto-échauffement (qui constitue un signal parasite).

Ainsi, avec les résonateurs utilisés dans l'invention, la mesure n'est pas soumise à des fluctuations liées à l'actionnement de la poutre.

#### Agencement spatial des résonateurs du réseau

Une particularité d'un réseau mis en œuvre dans un système selon l'invention est la  
5 densité des résonateurs appartenant audit réseau.

Plus précisément, une densité supérieure à 100 résonateurs / mm<sup>2</sup>, de préférence supérieure à 1000 résonateurs / mm<sup>2</sup> est appropriée pour un tel réseau.

En effet, cette densité permet d'assurer que l'ensemble des résonateurs du réseau soient soumis simultanément au même environnement, et notamment au  
10 même échantillon de gaz à analyser.

De plus, elle permet de réduire les risques de dispersions de fabrication entre résonateurs, ces dispersions étant d'autant plus grandes que le réseau est spatialement étendu.

Par ailleurs, cette densité permet de former un réseau formé d'un grand nombre de  
15 résonateurs qui soit suffisamment compact pour pouvoir être introduit dans un canal fluïdique dans laquelle circule l'échantillon de gaz à analyser, transporté par un gaz porteur.

A cet égard, on pourra noter que le réseau décrit dans [Bargatin2012] occupe une surface de 0,14 mm sur 1 mm, qui est difficilement compatible avec l'intégration dans un  
20 canal fluïdique, dont la section est typiquement équivalente à celle d'un canal de section circulaire dont le diamètre est inférieur ou égal à 1 mm (un tel canal est généralement désigné par le terme « micro-fluïdique »).

Enfin, une densité élevée de résonateurs permet de couvrir au mieux la surface du canal fluïdique et par conséquent de rendre compte plus finement de la composition de  
25 l'échantillon à analyser.

Les figures 3A et 3B illustrent deux modes d'agencement des résonateurs NEMS permettant d'obtenir la densité souhaitée.

La figure 3A illustre en vue de dessus une partie d'un réseau de résonateurs du type de celui illustré à la figure 1 selon un premier mode de réalisation.

30 Sur cette figure, seul un résonateur 1 a été représenté.

Le cadre en trait pointillé fort désigne une maille élémentaire du réseau, le réseau étant constitué d'une pluralité de telles mailles adjacentes agencées en lignes et/ou en colonnes.

Les deux niveaux de lignes d'interconnexion permettant la connexion électrique des  
35 résonateurs est également représentée.

Un premier niveau de lignes d'interconnexion métalliques parallèles est désigné par le repère M1 (lignes verticales sur la figure 3A).

Dans ce niveau, une première paire de lignes (la plus à gauche sur la maille élémentaire de la figure 3A) est connectée aux électrodes 6, 6' d'actionnement électrostatique ; une seconde paire de lignes (au centre de la maille élémentaire) est connectée aux électrodes 5, 5' d'application du potentiel aux jauges de contraintes ; enfin,  
5 une troisième ligne d'interconnexion (la plus à droite sur la maille élémentaire de la figure 3A) est connectée à l'électrode 7 de sortie du résonateur.

Un deuxième niveau de lignes d'interconnexion métalliques est désigné par les repères M2 et M2' (lignes horizontales sur la figure 3A).

Les lignes M2, M2' sont parallèles entre elles et perpendiculaires aux lignes  
10 d'interconnexion du premier niveau.

Les lignes M2, respectivement M'2, sont au nombre de trois et s'étendent de manière symétrique par rapport à l'axe longitudinal du résonateur.

Deux lignes (les plus proches du résonateur) sont destinées à la transmission du signal d'excitation des résonateurs ; deux lignes (les plus éloignées du résonateur) sont  
15 destinées à la transmission du signal de sortie des résonateurs ; enfin, deux lignes (intermédiaires entre les deux paires de lignes précitées) sont destinées à l'application de la tension de polarisation des électrodes des jauges de contrainte.

A cet effet, les lignes M2, M'2 sont connectées par des via d'interconnexion V aux lignes correspondantes du premier niveau d'interconnexion M1.

20 A titre purement indicatif, on peut obtenir avec cette configuration une dimension de maille élémentaire présentant une longueur (parallèle à la poutre) de 18  $\mu\text{m}$  et une largeur de 41,2  $\mu\text{m}$ , ou encore de 10,5  $\mu\text{m}$  par 26,3 $\mu\text{m}$ , voire de 7,5  $\mu\text{m}$  par 20,3  $\mu\text{m}$ .

Naturellement, l'organisation de ces niveaux d'interconnexion peut être modifiée par l'homme du métier sans pour autant sortir du cadre de l'invention.

25 Pour former le réseau, on connecte chaque résonateur en parallèle au deuxième niveau de lignes d'interconnexion M2, M'2, au moyen d'un premier niveau de lignes d'interconnexion du même type que les lignes M1 décrites ci-dessus.

La figure 3B illustre en vue de dessus une partie d'un réseau de résonateurs du type de celui illustré à la figure 1 selon un autre mode de réalisation.

30 Par rapport au réseau de la figure 3A, le réseau de la figure 3B est encore plus dense.

Les deux niveaux d'interconnexion décrits en référence à la figure 3A sont similaires et ne seront donc pas décrits à nouveau.

Dans ce réseau, les résonateurs sont agencés « tête-bêche », c'est-à-dire que, dans  
35 une ligne de résonateurs agencés en parallèle, chaque résonateur a deux voisins qui lui sont chacun symétriques par rapport à un plan perpendiculaire à l'axe longitudinal des poutres.

Ceci permet de mettre en commun à deux résonateurs les lignes du premier niveau d'interconnexion destinées à transmettre le signal d'excitation ainsi que la ligne de transmission du signal de sortie, d'où un gain en compacité du système.

5 A titre purement indicatif, on peut obtenir avec cette configuration une dimension de maille élémentaire (comprenant 4 résonateurs) présentant une longueur (parallèle à la poutre) de 44  $\mu\text{m}$  et une largeur de 41,2  $\mu\text{m}$ , ou encore de 28  $\mu\text{m}$  par 26,3  $\mu\text{m}$ , voire de 20  $\mu\text{m}$  par 20,3  $\mu\text{m}$ .

10 Sur ce principe, on peut donc organiser par exemple des matrices constituées de plusieurs lignes et colonnes de résonateurs agencés selon le motif de la figure 3A ou celui de la figure 3B.

La figure 4 illustre en vue de dessus la connexion électrique d'un réseau de résonateurs selon l'agencement illustré à la figure 3A.

15 Les lignes M2, M2' du deuxième niveau d'interconnexion des résonateurs sont connectées à deux électrodes de sortie pour la transmission du signal s de sortie, deux électrodes d'application des tensions de polarisation Vb, -Vb aux jauges de contrainte et deux électrodes d'entrée pour l'application du signal d'excitation e, -e.

#### Organisation du réseau en groupes de résonateurs

Par ailleurs, et contrairement au réseau décrit dans [Bargatin2012], tous les résonateurs du réseau ne présentent pas la même fréquence de résonance à vide.

20 En effet, le réseau comprend au moins deux groupes d'au moins deux résonateurs, les résonateurs de chaque groupe présentant une fréquence de résonance à vide identique, différente de la fréquence de résonance à vide des résonateurs de chacun des autres groupes.

25 Dans la suite, on désignera par « fréquence de résonance à vide » d'un groupe la fréquence de résonance à vide de chacun des résonateurs formant ledit groupe, étant entendu qu'au sein d'un même groupe tous les résonateurs présentent une fréquence de résonance à vide identique.

30 Par « différente », on entend le fait que, dans une série de fréquences de résonance à vide croissantes, une fréquence de résonance à vide est supérieure d'au moins 1% à la fréquence de résonance à vide immédiatement inférieure.

Le terme « groupe » s'entend non seulement en termes de caractéristiques identiques des résonateurs (même fréquence de résonance à vide), mais aussi sur le plan spatial, les résonateurs d'un même groupe étant adjacents et par conséquent rassemblés sur une portion réduite de la surface totale du réseau.

35 La distance entre groupes de résonateurs peut être identique à la distance entre deux résonateurs d'un même groupe.

De manière alternative, deux groupes adjacents peuvent être séparés par une distance plus grande que la distance séparant deux résonateurs ; par exemple, selon les

contraintes de fabrication, une certaine distance peut être ménagée entre des groupes adjacents que l'on souhaite fonctionnaliser différemment.

D'une manière générale, les dimensions du réseau sont limitées par la longueur de diffusion des particules de l'échantillon gazeux, qui est de l'ordre du millimètre.

5 Le nombre de résonateurs peut être identique pour tous les groupes ou varier d'un groupe à l'autre.

La connexion électrique des résonateurs du réseau est réalisée de la manière suivante.

10 D'une part, les résonateurs formant un même groupe sont connectés en parallèle, chaque groupe comprenant une entrée et une sortie connectées respectivement à l'entrée et à la sortie de chacun desdits résonateurs,

D'autre part, les groupes de résonateurs formant le réseau sont connectés en parallèle, ledit réseau comprenant une entrée et une sortie connectées respectivement à l'entrée et à la sortie de chacun desdits groupes de résonateurs.

15 Ainsi, le nombre d'entrées et de sorties du réseau est identique à celui d'un résonateur unitaire, ce qui ne complexifie pas l'architecture électrique.

Cette décomposition du réseau en groupes de résonateurs présente les avantages suivants.

D'une part, elle permet de limiter les effets des dispersions de fabrication.

20 En effet les dispersions d'un résonateur à l'autre sont d'autant plus grandes que les résonateurs sont distants l'un de l'autre.

Ainsi, même si le réseau est très compact grâce à un agencement optimal des résonateurs, deux résonateurs situés à deux extrémités opposées du réseau sont susceptibles de présenter des dispersions non négligeables.

25 Au contraire, au sein d'un même groupe, les dispersions entre résonateurs sont minimisées.

Par ailleurs, même s'il existe des dispersions entre des groupes de résonateurs distincts, il est possible de s'en affranchir par une correction mathématique, chaque groupe étant adressé indépendamment des autres.

30 Un autre avantage de cette décomposition du réseau en groupes est la possibilité de fonctionnaliser les résonateurs appartenant à des groupes différents avec des espèces chimiques différentes.

Ainsi, si les espèces chimiques de fonctionnalisation sont judicieusement choisies en fonction de l'échantillon de gaz à analyser, un même réseau est en mesure de fournir  
35 simultanément des informations sur plusieurs espèces contenues dans l'échantillon.

De manière avantageuse, l'obtention de fréquences de résonance à vide différentes entre groupes de résonateurs est due à la réalisation de résonateurs dont les poutres ont

des longueurs différentes d'un groupe à l'autre, leurs autres caractéristiques mécaniques et géométriques étant par ailleurs identiques.

En effet, la fréquence de résonance à vide  $F^*$  d'un résonateur est définie par la formule suivante :

$$F^* = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho s}} \left( \frac{2,1178}{L} \right)^2$$

5 avec  $I = \frac{w^3 e}{12}$  et  $s = w e$ ,

où  $E$  est le module d'Young du matériau constituant le résonateur NEMS,  $\rho$  sa masse volumique,  $I$  le moment d'inertie du résonateur,  $s$  sa section,  $L$  et  $w$  respectivement la longueur et la largeur de la poutre vibrante, et  $e$  son épaisseur.

10 Le dimensionnement des résonateurs de chaque groupe est réalisé en déterminant, pour chaque groupe de résonateurs, un intervalle de variation maximale de fréquence de résonance attendue et en choisissant des longueurs de poutre (ou une autre caractéristique mécanique du résonateur) définissant des fréquences de résonance à vide suffisamment espacées les unes des autres pour que les intervalles de variation susmentionnés ne se chevauchent pas.

15 De préférence, des marges de sécurité sont prises en compte pour tenir compte d'éventuelles dispersions de fabrication.

Grâce à un tel dimensionnement des résonateurs de chacun des groupes, il est possible d'obtenir séparément et avec une bonne précision les informations des groupes de résonateurs du réseau.

20 La figure 5 illustre en vue de dessus un exemple de mise en œuvre d'un réseau tel que décrit ci-dessus dans un canal fluidique.

Ledit canal est gravé dans un support, par exemple de silicium, et collé sur le support des résonateurs NEMS, qui est ici une puce de silicium dopé, référencée C1.

25 Les surfaces hachurées C2 correspondent à l'interface de collage du support que l'on applique sur la puce C1 afin de former un canal fluidique sur la puce C1.

Le canal fluidique ainsi ménagé est repéré par la référence C3.

Les dimensions apparaissant sur cette figure sont exprimées en micromètres et visent simplement à fournir un exemple particulier d'implémentation d'un système de mesure, mais en aucun cas à limiter l'invention.

30 Dans cet exemple, le réseau comprend 5 groupes de résonateurs G1 à G5, chaque groupe présentant une fréquence de résonance à vide différente.

Les bandes verticales numérotées de 1 à 30 désignent les pistes de connexion à l'entrée, à la sortie et à la polarisation des jauges de contrainte de chacun des groupes de résonateurs.

Dans le cadre d'un système d'analyse de gaz, le canal fluide dans lequel est agencé le réseau peut typiquement être agencé en aval d'une colonne de chromatographie.

5 Les moyens de liaison fluide entre la colonne et un tel canal sont connus en eux-mêmes : il peut s'agir d'un capillaire de silice désactivée ou, si la colonne de chromatographie est elle-même gravée dans une puce de silicium, comme cela est décrit dans le document WO 2011/154362, le canal fluide peut éventuellement être gravé dans la même puce.

10 De manière alternative, au moins un réseau tel que décrit plus haut peut être agencé à l'intérieur même d'une colonne de chromatographie gravée dans une puce de silicium.

De manière particulièrement avantageuse, on peut instrumenter ladite colonne en y installant une pluralité de réseaux distribués régulièrement entre l'entrée et la sortie de ladite colonne.

#### 15 Lecture du réseau

La lecture du réseau repose sur un adressage individuel des différents groupes de résonateurs, les résonateurs d'un même groupe étant adressés collectivement.

Cet adressage étant réalisé à partir des fréquences de résonance de chaque groupe de résonateurs, on peut le qualifier d'adressage fréquentiel.

20 La figure 6 illustre de manière schématique l'architecture électrique du système.

Chaque groupe de résonateurs NEMS du réseau est désigné par le repère  $102_i$ , où  $i$  est un entier compris entre 1 et  $N$ ,  $N$  étant le nombre de groupes formant le réseau.

Chacun de ces groupes est muni d'une entrée  $104_i$  pour recevoir un signal d'excitation et une sortie  $106_i$  pour fournir un signal de sortie.

25 Lorsque l'on applique à l'entrée  $104_i$  de chaque groupe de résonateurs un signal d'excitation  $e$ , comprenant une composante fréquentielle correspondant à la fréquence de résonance à vide (notée  $F_i^*$ ) des résonateurs dudit groupe, les poutres des résonateurs sont entraînées en vibration, ce qui se traduit par la génération, par les jauges de contraintes associées à chaque poutre, d'un signal électrique de sortie qui correspond au  
30 signal d'excitation  $e$ , amplifié de manière importante autour de la fréquence de résonance  $F_i$ .

Les résonateurs d'un même groupe étant agencés en parallèle et collectivement adressés, le signal de sortie  $s_i$  du groupe est une combinaison des signaux de chaque résonateur.

35 Le système comprend en outre un dispositif 108 de sommation des signaux de sortie  $s_i$  en un signal total de sortie  $s$ .

Le système comprend par ailleurs un dispositif 110 de lecture des groupes de résonateurs  $102_i$ , qui est conçu pour fournir le signal d'excitation  $e$  à l'entrée du réseau, ledit signal d'excitation étant fourni à chaque groupe de résonateurs.

5 Le dispositif de lecture 110 est en outre conçu pour déterminer la fréquence de résonance d'un groupe de résonateurs sélectionné en injectant dans ledit signal d'excitation  $e$  une composante fréquentielle correspondant à la fréquence de résonance à vide mémorisée pour chaque groupe de résonateurs sélectionné et en identifiant, dans le signal total de sortie du réseau, une composante fréquentielle d'un groupe de résonateurs sélectionné.

10 Selon un mode de réalisation préféré, le dispositif de lecture comprend un circuit de boucle à phase asservie 112 (PLL, acronyme du terme anglo-saxon « Phase-Locked Loop »).

Ledit circuit 112 est avantageusement conçu pour caler une fréquence du signal d'excitation sur la fréquence d'un pic de résonance du signal de sortie du réseau et pour  
15 fournir, en tant que fréquence de résonance d'excitation, la fréquence calée.

A cet effet, le circuit de boucle à phase asservie 112 comprend un oscillateur contrôlé en tension 114 qui est contrôlé par une tension  $F$  et connecté aux entrées  $104_i$  des groupes  $102_i$  de résonateurs pour leur fournir le signal d'excitation  $e$ , ledit signal étant périodique et monofréquentiel, de fréquence correspondant à la fréquence de la tension  
20  $F$ .

Le circuit 112 comporte en outre un comparateur de phase 116 connecté au dispositif de sommation 108 pour recevoir le signal total de sortie  $s$  et conçu pour déterminer et fournir un déphasage  $d\Phi$  entre le signal total de sortie  $s$  et le signal d'excitation  $e$ .

25 Le circuit 112 comporte en outre un contrôleur 118 comparé au comparateur de phase 114 et conçu pour déterminer et fournir la tension  $F$  à l'oscillateur contrôlé en tension 114 à partir du déphasage  $d\Phi$ .

Le dispositif de lecture 110 comporte en outre une mémoire 120 dans laquelle sont enregistrés, d'une part, les fréquences de résonance à vide  $F^*_i$  des groupes de résonateurs et, d'autre part, un déphasage initial  $d\Phi_i$  pour chaque groupe  $102_i$  de résonateurs.  
30

Par ailleurs, le dispositif de lecture 110 comprend des moyens de sélection de chacune des fréquences de résonance à vide  $F^*_i$  enregistrées et de chacun des déphasages initiaux  $d\Phi_i$  enregistrés dans ladite mémoire 120.

35 Un avantage d'utiliser une boucle à phase asservie (PLL) par rapport à un autre dispositif, tel qu'un oscillateur ou une boucle ouverte comme proposé dans les articles cités plus haut est de mieux s'affranchir des dispersions.

En effet, bien que la boucle à phase asservie soit plus encombrante et plus complexe qu'un oscillateur qui ne nécessite que quelques transistors et met en œuvre une conversion analogique-numérique aisée (compteurs), la boucle à phase asservie est plus robuste vis-à-vis des bruits et des dispersions. Elle permet en outre de sélectionner le mode de résonance et présente une bande passante ou un temps de réponse ajustables.

#### Mesure différentielle

Un réseau tel que décrit ci-dessus présente l'avantage de présenter un bruit très faible.

10 Dans certaines situations, il pourra être avantageux de s'affranchir du bruit extrinsèque au réseau en mettant en œuvre une mesure différentielle faisant appel à un résonateur ou réseau de résonateurs de référence, en faisant en sorte que le résonateur ou réseau de résonateurs de référence soit soumis au même environnement susceptible de générer des fluctuations, mais que ce résonateur ou réseau de résonateurs présente  
15 une réponse à l'échantillon de gaz qui soit différente de celle du réseau considéré.

En effet, une mesure différentielle permet d'éliminer l'influence de paramètres extérieurs - autres que l'adsorption du gaz par les résonateurs NEMS - responsables d'une modification de la fréquence de résonance des NEMS. On peut citer à titre d'exemple des fluctuations de température, des fluctuations du flux du gaz porteur, etc.

20 Le principe de cette méthode est expliqué ci-après sur la base d'un résonateur NEMS cible pour lequel on cherche à s'affranchir du bruit extrinsèque, et d'un résonateur NEMS de référence permettant de mettre en œuvre la mesure différentielle, mais il va de soi qu'il s'applique également si l'on remplace le résonateur cible et/ou le résonateur de référence par un réseau comprenant un ou plusieurs groupes de résonateurs  
25 collectivement adressés.

L'efficacité de cette méthode de mesure repose essentiellement sur le fait que les deux résonateurs NEMS sont situés le plus près possible l'un de l'autre, de sorte à être soumis aux mêmes fluctuations, et que l'un des résonateurs NEMS ne soit pas (ou très peu) sensible au gaz à identifier.

30 Deux modes de réalisation permettent de remplir des conditions.

Selon un premier mode de réalisation, on met en place les NEMS dans deux canaux fluidiques distincts.

Ainsi, l'un des NEMS sera soumis au gaz porteur et à l'échantillon de gaz à analyser, tandis que l'autre (résonateur de référence) sera soumis uniquement au gaz porteur.  
35

Selon un deuxième mode de réalisation, on met en place deux NEMS fonctionnalisés de manière différente dans le même canal fluidique.

En choisissant deux fonctionnalisations très différentes en termes d'adsorption du gaz à analyser, il est possible alors de réaliser une mesure différentielle. A cet effet, on fonctionnalise l'un des NEMS avec une espèce chimique sensible à l'échantillon de gaz à analyser et tandis que l'autre NEMS n'est pas fonctionnalisé par dépôt d'une couche spécifique (ledit résonateur peut, par exemple, être oxydé naturellement), ou est  
5 fonctionnalisé avec une espèce chimique non sensible au gaz à analyser. Par exemple, le résonateur NEMS cible peut être fonctionnalisé avec du SiOC et le résonateur de référence est simplement recouvert d'une couche d'oxyde natif.

Quelle que soit l'architecture de mesure retenue, la mesure électrique des deux  
10 résonateurs NEMS doit être réalisée individuellement afin de dissocier les fluctuations de la fréquence de résonance de l'un par rapport à l'autre.

Plusieurs approches de lecture électrique sont possibles :

- une mesure réalisée via 2 électroniques distinctes (lecture parallèle). Cependant, cette première approche n'est pas privilégiée car elle ne permet pas de s'affranchir des  
15 fluctuations associées à l'électronique de lecture ;

- une mesure réalisée via la même électronique en réalisant une mesure séquentielle dans le temps (chaque résonateur NEMS est lu alternativement sur une période de l'ordre de la ms afin d'assurer une lecture quasi-simultanée des 2 NEMS : la notion de quasi-simultanéité est définie en regard de la durée d'un pic de gaz et des  
20 fluctuations de la fréquence de résonance des NEMS ; en pratique, la durée de lecture de chaque résonateur NEMS est inférieure ou égale à 100 ms).

Cette seconde approche permet de s'affranchir des fluctuations de l'électronique de lecture en plus des fluctuations environnementales pouvant affecter la fréquence de résonance des résonateurs NEMS.

25 La mise en œuvre pratique de cette mesure peut être réalisée selon un adressage fréquentiel (deux résonateurs NEMS avec deux fréquences de résonance à vide différentes reliés en parallèle) ou bien avec l'utilisation d'un commutateur pour commuter d'un résonateur NEMS à l'autre dans le temps.

Une fois la mesure simultanée (ou quasi simultanée à l'échelle de la durée des pics  
30 de gaz) des deux résonateurs NEMS réalisée, le travail de traitement du signal consiste principalement à soustraire la réponse du résonateur NEMS de référence de la réponse du résonateur NEMS cible pour éliminer ainsi toutes les fluctuations de la fréquence de résonance induites par des paramètres extérieurs autres que l'échantillon de gaz s'adsorbant sur les résonateurs NEMS.

35 Dans le cadre du système de mesure selon l'invention, le résonateur ou groupe de résonateurs de référence peut faire partie du réseau lui-même, et ne pas comporter de fonctionnalisation spécifique de manière à être notablement moins sensible que les autres groupes de résonateur à l'échantillon gazeux à analyser.

Comme mentionné plus haut, ce principe de mesure différentielle n'est pas limité à un réseau de NEMS mais peut être mis en œuvre de manière générale pour s'affranchir des fluctuations extérieures à un résonateur NEMS, qu'il fasse partie ou non d'un réseau.

La comparaison des signaux dudit résonateur et d'un résonateur de référence  
5 permet d'améliorer le rapport signal sur bruit dudit résonateur.

#### Fonctionnement du système

Au cours d'une opération de calibration, les fréquences de résonance à vide  $F^*i$  et les déphasages initiaux  $d\Phi_i$  sont déterminés par exemple en balayant en boucle ouverte l'espace des fréquences avec l'oscillateur contrôlé en tension 114.

10 Ces données sont enregistrées dans la mémoire 120.

En fonctionnement, on fait circuler dans le canal fluïdique dans lequel est agencé le réseau de résonateurs l'échantillon gazeux à analyser, qui est transporté par un gaz porteur.

En général, le gaz porteur et l'échantillon proviennent d'une colonne de  
15 chromatographie agencée en amont.

Au cours d'une opération de lecture d'un groupe de résonateurs 102i, les moyens de sélection 122 sélectionnent la fréquence de résonance à vide  $F^*i$  et le déphasage  $d\Phi_i$  dudit groupe de résonateurs dont la lecture est souhaitée.

Les moyens de démarrage injectent alors ces valeurs dans la boucle à phase  
20 asservie 112, de manière à assurer l'accrochage de ladite boucle 112 à la fréquence de résonance du groupe de résonateurs 102i.

Ainsi, au terme d'un temps de calage qui est généralement de l'ordre de 50  $\mu$ s, la fréquence calée F correspond à la fréquence de résonance du groupe de résonateurs 102i.

25 L'opération de lecture est répétée successivement pour tous les groupes de résonateurs formant le système.

Par la suite, la grandeur physique dont la mesure est recherchée par la mesure du groupe de résonateurs (par exemple, la masse d'une espèce de l'échantillon gazeux adsorbée sur les poutres des résonateurs dudit groupe) est déterminée à partir de la  
30 fréquence de résonance lue et de la fréquence de résonance à vide dudit groupe de résonateurs, par exemple à partir de la différence entre la fréquence de résonance et la fréquence de résonance à vide.

Cette détermination est à la portée de l'homme du métier spécialiste de l'analyse gravimétrique de gaz et ne sera donc pas détaillée ici.

35 On notera que d'autres modes de réalisation du dispositif de lecture pourront être mis en œuvre sans pour autant sortir du cadre de l'invention. On pourra à cet égard se référer à la demande PCT/FR2012/050682 déposée le 29 mars 2012.

### Traitement des signaux

Une fois lus les signaux de sortie de chaque groupe de résonateurs (notés  $x_i(t)$ ), on les fusionne de façon à obtenir un signal  $X(t)$  présentant des caractéristiques améliorées.

Le système de mesure comporte à cet effet un système de traitement permettant  
5 d'implémenter un algorithme de fusion.

Différents algorithmes permettent d'effectuer une telle fusion de données et sont à la portée de l'homme du métier selon les caractéristiques des signaux individuels.

D'une manière générale, la fusion de données consiste à combiner des signaux, de préférence à les comparer, par exemple par soustraction ou par division.

10 Par exemple, dans le cas où les bruits de chaque groupe sont totalement indépendants (décorrélés) les uns des autres, la fusion peut consister à effectuer une moyenne spatiale desdits signaux après les avoir normalisés, selon la formule :

$$X(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{x_i(t) - \langle x_i(t) \rangle}{\langle x_i(t) \rangle} \quad (f1)$$

l'opérateur  $\langle x_i(t) \rangle$  désignant une moyenne temporelle du signal  $x_i$ , par exemple sur  
15 la durée de l'expérience.

Lorsque les bruits sont corrélés, une stratégie de fusion possible peut être basée sur la mesure différentielle décrite plus haut, selon la formule suivante :

$$X(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{x_i(t) - \langle x_i(t) \rangle}{\langle x_i(t) \rangle} - \frac{x_{ref}(t) - \langle x_{ref}(t) \rangle}{\langle x_{ref}(t) \rangle} \quad (f2)$$

où  $x_{ref}(t)$  est le signal de sortie d'un résonateur (ou d'un réseau de résonateurs,  
20 éventuellement constitué de différents groupes de résonateurs) de référence, qui n'est pas agencé dans le même canal fluïdique ou qui est agencé dans le même canal mais qui présente une réponse à l'échantillon gazeux indépendante de celle du réseau utilisé pour la mesure.

Naturellement, l'homme du métier pourra mettre en œuvre tout autre algorithme  
25 sans pour autant sortir du cadre de la présente invention.

### Validations expérimentales du système

Les inventeurs ont validé expérimentalement les performances du système décrit plus haut.

Dans une première approche, pour valider la technique de lecture, les réseaux  
30 testés étaient composés d'une pluralité de résonateurs présentant chacun une fréquence de résonance à vide différente (en d'autres termes, chaque groupe de résonateurs était constitué d'un unique résonateur).

Pour mettre en évidence la possibilité de s'affranchir des fluctuations externes au réseau, une première expérience a consisté à réaliser un réseau de 4 résonateurs  
35 présentant des fréquences de résonance différentes.

Lesdits résonateurs étaient connectés en parallèle et reliés au même dispositif de lecture, qui était conçu pour lire les signaux de chaque résonateur par la technique

d'adressage fréquentiel décrite plus haut. L'architecture électrique était celle représentée à la figure 6.

La figure 7 présente le signal ( $df/f$ ) en fonction du temps pour chacun des quatre résonateurs NEMS1 à NEMS4, la mesure étant effectuée dans l'air, à pression  
5 atmosphérique.

On observe dans ce cas une forte corrélation des signaux issus des différents résonateurs.

Dans ce cas, la source de bruit prépondérante est le bruit en  $1/f$  du dispositif de lecture.

10 Il est cependant possible de s'affranchir de ce bruit en appliquant l'algorithme de fusion défini par la formule (f2) à la moyenne des signaux des résonateurs NEMS1 à NEMS4, le résonateur de référence étant ici le résonateur NEMS1.

On peut constater que le signal reconstruit grâce à cette fusion présente une forte atténuation du bruit en  $1/f$ .

15 La figure 8 présente ainsi la densité spectrale de fréquence (DSP, exprimée en dB/Hz) pour les signaux issus de chacun des résonateurs NEMS1 à NEMS4 et pour le signal reconstruit X.

On observe un gain de l'ordre de 20 dB sur la densité spectrale de puissance sur la bande comprise entre 0 et 0,1 Hz.

20 Cette amélioration peut également être constatée sur la variance d'Allan qui est illustrée à la figure 9. Il existe en effet une bijection entre la densité spectrale de fréquence et la variance d'Allan.

On observe ainsi une diminution de la variance d'Allan selon une pente constante dans une bande de période d'intégration qui correspond au bruit en  $1/f$ , et pour laquelle la  
25 variance d'Allan de chacun des résonateurs stagne.

Ainsi, dans le cas où la source de bruit prédominante est externe aux résonateurs (ce qui est typiquement le cas de l'électronique de lecture), la mise en réseau des résonateurs permet d'éliminer ce bruit en mettant en œuvre une technique de fusion telle que décrite ci-dessus.

30 Une deuxième expérience a été conduite pour mettre en évidence la capacité du système à réduire les sources de bruit intrinsèques aux résonateurs.

Dans cette expérience, un réseau de 45 résonateurs a été réalisé et mesuré dans l'air, à pression atmosphérique.

Le signal équivalent aux 45 signaux a été reconstruit par l'algorithme de fusion selon  
35 la formule (f1).

La figure 10 présente la variance d'Allan pour chacun des 45 résonateurs NEMS1 à NEMS45 et pour le signal X reconstruit.

On observe une amélioration de la variance d'Allan par un facteur d'environ  $\sqrt{45} = 6,7$  sur le bruit blanc, ce qui montre que l'effet réseau a été obtenu.

Une expérience similaire a été réalisée sous vide, avec un réseau de 16 résonateurs.

5 Le signal équivalant aux 16 réseaux a été reconstruit par l'algorithme de fusion selon la formule (f1).

La figure 11 présente la variance d'Allan pour chacun des 16 résonateurs NEMS1 à NEMS16 et pour le signal X reconstruit.

10 On observe une amélioration de la variance d'Allan par un facteur d'environ  $\sqrt{16} = 4$  sur le bruit blanc, ce qui montre que l'effet réseau a été obtenu.

Dans ce cas, la source de bruit en  $1/f$  est intrinsèque aux résonateurs.

A long terme, on observe une dérive de la variance d'Allan qui est due à une corrélation entre les bruits des résonateurs. Il est cependant possible de s'affranchir de cette dérive en effectuant une mesure différentielle telle que décrite plus haut.

15 Une autre expérience a été réalisée avec un réseau constitué d'un groupe de 75 résonateurs présentant tous la même fréquence de résonance à vide.

La figure 12 illustre la variance d'Allan pour un résonateur unitaire (courbe (a)) et pour ledit groupe de résonateurs (courbe (b)), dans la plage de temps d'intégration correspondant au bruit en  $1/f$ .

20 On observe une réduction d'un facteur environ égal à 6 pour le groupe de résonateurs, ce qui est relativement proche de l'effet réseau attendu ( $\sqrt{75} = 8,66$ ).

Enfin, une expérience permettant de mettre en évidence l'amélioration de la limite de détection dans le cas du groupe de 75 résonateurs mentionné ci-dessus par rapport à un résonateur unitaire a été réalisée en injectant séquentiellement trois échantillons de  
25 toluène sur le groupe de résonateurs et sur le résonateur unitaire.

La figure 13A illustre le déplacement de fréquence  $f_s$  (« frequency shift » selon la terminologie anglo-saxonne) pour le résonateur unitaire. On observe un bruit important sur le signal enregistré.

30 La figure 13B illustre le déplacement de fréquence pour le groupe de 75 résonateurs. On peut observer que le bruit est sensiblement plus faible que dans le premier cas.

Enfin, la figure 13C présente la superposition des courbes des figures 13A (courbe (a)) et 13B (courbe (b)), qui montre que le bruit est sensiblement diminué avec le groupe de résonateurs, de sorte que la limite de détection est améliorée significativement.

35 Procédé de fabrication du réseau

Du fait de la mise en œuvre d'une détection piézorésistive au moyen de jauges de contrainte en matériau semi-conducteur dopé, il est possible de réaliser chaque

résonateur sur un substrat dudit matériau semi-conducteur par des techniques de la microélectronique, comprenant de la photolithographie et de la gravure.

De manière avantageuse, ledit matériau semi-conducteur est du silicium.

5 Pour connecter les résonateurs en réseau, deux niveaux d'interconnexion sont réalisés par métallisation, et des via d'interconnexion sont formées pour connecter ces deux niveaux.

De manière particulièrement avantageuse, les résonateurs du réseau sont fabriqués collectivement sur une partie d'un substrat, qui peut ensuite être individualisée pour former une puce portant ledit réseau.

10 On peut ainsi réaliser, à partir d'un substrat de silicium de 200 ou 300 mm de diamètre, fabriquer une pluralité de puces supportant chacune un ou plusieurs réseaux.

Une telle puce présente des dimensions micrométriques qui permettent son agencement dans une veine fluide d'un système d'analyse de gaz.

15 Par ailleurs, les différents groupes de résonateurs peuvent être fonctionnalisés par une même espèce chimique, dont l'uniformité est assurée par des techniques de dépôt physique ou chimique en phase vapeur (PVD ou CVD).

De manière alternative, les différents groupes de résonateur constituant le réseau peuvent être fonctionnalisés avec des espèces chimiques différentes, selon les espèces contenues dans l'échantillon de gaz à analyser.

20 On effectue alors un dépôt PVD ou CVD de manière sélective sur le(s) groupe(s) à fonctionnaliser, par exemple par une technique dite de « lift-off » ou par un masquage par pochoir.

Comme mentionné plus haut, un avantage de cette conception des résonateurs est qu'elle permet de diminuer les dispersions de fabrication.

25 On estime ainsi que l'on peut atteindre des dispersions inférieures à 0,1% sur la fréquence de résonance des résonateurs appartenant à un même groupe au sein du réseau.

Ces dispersions peuvent donc être considérées comme négligeables dans le fonctionnement du réseau.

30

35

**REFERENCES**

[Bargatin2012] I. Bargatin, E.B. Myers, J.S. Aldridge, C. Marcoux, P. Brianceau, L. Duraffourg, E. Colinet, S. Hentz, P. Andreucci, M.L. Roukes, Large-Scale Integration of Nanoelectromechanical Systems for Gas Sensing Applications, NanoLetters 12, 1269-1274 (2012)

[Mile2010] E. Mile, G. Jourdan, I. Bargatin, S. Labarthe, C. Marcoux, P. Andreucci, S. Hentz, C. Kharrat, E. Colinet, L. Duraffourg, In-plane nanoelectromechanical resonators based on silicon nanowire piézorésistives detection, Nanotechnology 21, (2010) 165504

10 WO 2011/154363  
EP 2 008 965  
WO 2012/034990  
WO 2012/034951  
WO 2011/154362

15

## REVENDICATIONS

1. Système de mesure comprenant un réseau de résonateurs de type nano-système électromécanique (NEMS), caractérisé en ce que :
- 5 • chacun desdits résonateurs comprend :
- une entrée pour recevoir un signal d'excitation et une sortie pour fournir un signal de sortie en réponse audit signal d'excitation, ledit signal de sortie présentant une résonance à la fréquence de résonance du résonateur,
  - une poutre suspendue par rapport à un support, la fréquence de résonance à vide du résonateur correspondant à la fréquence de résonance à vide de ladite poutre,
  - 10 - un dispositif d'actionnement électrostatique apte à générer une vibration de ladite poutre sous l'effet dudit signal d'excitation,
  - au moins une jauge de contrainte piézorésistive en matériau semi-conducteur dopé, suspendue par rapport audit support et s'étendant à partir de la poutre de sorte à détecter un déplacement de ladite poutre, la variation de résistance électrique de ladite au moins une jauge fournissant ledit signal de sortie,
  - 15 • ledit réseau comprend au moins deux groupes de résonateurs, chaque groupe comprenant au moins deux résonateurs présentant une fréquence de résonance à vide identique, chaque groupe de résonateurs présentant une fréquence de résonance à vide différente de celle de chaque autre groupe,
  - 20 • le système comprend une mémoire dans laquelle est enregistrée une information relative à la fréquence de résonance à vide de chaque résonateur ou groupe de résonateurs,
  - les résonateurs formant chaque groupe sont connectés en parallèle, chaque groupe comprenant une entrée et une sortie connectées respectivement à l'entrée et à la sortie de chacun desdits résonateurs,
  - 25 • les groupes de résonateurs formant ledit réseau sont connectés en parallèle, ledit réseau comprenant une entrée et une sortie connectées respectivement à l'entrée et à la sortie de chacun desdits groupes de résonateurs,
  - 30 • ledit système comprend un dispositif de lecture conçu pour fournir un signal d'excitation à l'entrée du réseau et pour déterminer la fréquence de résonance d'un groupe de résonateurs sélectionné en injectant dans ledit signal d'excitation une composante fréquentielle correspondant à la fréquence de résonance à vide mémorisée pour chaque groupe de résonateurs sélectionné et en identifiant, dans le signal de sortie du réseau, une composante fréquentielle de résonance du groupe
  - 35 de résonateurs sélectionné.

2. Système selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend un dispositif de sommation des signaux de sortie de chaque groupe de résonateurs du réseau en un signal total de sortie du réseau et en ce que le dispositif de lecture est conçu pour déterminer la fréquence de résonance d'un groupe de résonateurs à partir dudit signal total de sortie du réseau.

3. Système selon la revendication 2, caractérisé en ce que ledit dispositif de lecture comprend un circuit à boucle de phase asservie (PLL) conçu pour caler une fréquence du signal d'excitation sur la fréquence d'un pic de résonance du signal de sortie du réseau et pour fournir, en tant que fréquence de résonance d'excitation, la fréquence calée.

4. Système selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que chaque groupe de résonateurs est fonctionnalisé avec une espèce chimique différente.

5. Système selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que les résonateurs du réseau sont agencés sur un même support de sorte à former des lignes et des colonnes de résonateurs s'étendant parallèlement les uns aux autres, les poutres des résonateurs étant parallèles les unes aux autres.

6. Système selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que les résonateurs du réseau sont agencés sur un même support de sorte à former des lignes et des colonnes de résonateurs s'étendant parallèlement les uns aux autres, lesdits résonateurs étant en outre agencés de sorte que, sur une même ligne parallèle aux poutres des résonateurs, deux résonateurs adjacents soient symétriques par rapport à un plan parallèle à une colonne.

7. Système selon l'une des revendications 1 à 6, caractérisé en ce qu'il comprend au moins un canal fluide destiné à l'écoulement d'un échantillon gazeux à analyser, ledit réseau de résonateurs étant agencé dans ledit canal fluide de sorte que les poutres desdits résonateurs soient exposées audit échantillon.

8. Système selon la revendication 7, caractérisé en ce qu'il comprend au moins deux réseaux de résonateurs dans ledit canal fluide.

9. Système selon l'une des revendications 7 ou 8, caractérisé en ce qu'il comprend au moins un résonateur dit de référence agencé hors du canal fluide et connecté au même dispositif de lecture que le réseau agencé dans le canal fluide, et

en ce qu'il comprend un système de traitement configuré pour combiner le signal de sortie dudit résonateur de référence avec les signaux de sortie des groupes de résonateurs du réseau.

5           10. Système selon l'une des revendications 7 ou 8, caractérisé en ce que le  
réseau comprend au moins un résonateur dit de référence configuré pour être moins  
sensible à l'échantillon gazeux que les autres groupes de résonateurs et en ce que le  
système comprend un système de traitement configuré pour combiner le signal de sortie  
10 dudit résonateur de référence avec les signaux de sortie des groupes de résonateurs du  
réseau.

11. Système selon l'une des revendications 1 à 8, caractérisé en ce qu'il comprend  
un système de traitement configuré pour combiner les signaux de sortie de chaque  
groupe de résonateurs du réseau avec une moyenne desdits signaux  
15

12. Système selon l'une des revendications 7 à 11, caractérisé en ce qu'il  
comprend une colonne de chromatographie en phase gazeuse contenant ledit canal  
fluidique.

20           13. Système selon la revendication 12, caractérisé en ce que le canal de ladite  
colonne de chromatographie comprend une pluralité de réseaux de résonateurs distribués  
régulièrement entre l'entrée et la sortie de ladite colonne.

14. Système selon l'une des revendications 7 à 11, caractérisé en ce qu'il  
25 comprend une colonne de chromatographie en phase gazeuse en amont dudit canal  
fluidique dans la direction d'écoulement de l'échantillon gazeux.

15. Procédé de lecture d'un système selon l'une des revendications 1 à 14,  
caractérisé en ce qu'il comprend les étapes consistant à :

- 30
- sélectionner, parmi les groupes de résonateurs du réseau, un groupe de résonateurs à lire,
  - récupérer dans la mémoire l'information de résonance à vide de chaque groupe de résonateurs sélectionné,
  - appliquer un signal d'excitation au réseau comprenant une composante fréquentielle  
35 correspondant à la fréquence de résonance à vide de chaque groupe de résonateurs sélectionné,

- déterminer la fréquence de résonance de chaque groupe de résonateurs sélectionné en identifiant, dans le signal de sortie du réseau, une composante fréquentielle de résonance de chaque groupe de résonateurs sélectionné.

5           16. Procédé selon la revendication 15, caractérisé en ce que l'application dudit signal d'excitation génère dans le signal de sortie une composante fréquentielle principale correspondant à la résonance de chaque groupe de résonateurs sélectionné, et en ce que l'on détermine la fréquence de résonance de chaque groupe de résonateurs sélectionné en extrayant ladite composante fréquentielle du signal de sortie du réseau.

10

          17. Procédé de fabrication d'un système selon l'une des revendications 1 à 14, caractérisé en ce qu'il comprend la fabrication collective, sur un support en un matériau semi-conducteur, des résonateurs formant ledit réseau en mettant en œuvre des techniques de microélectronique.

15

          18. Procédé selon la revendication 17, caractérisé en ce qu'il comprend la fonctionnalisation collective des groupes de résonateurs dudit réseau par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ou dépôt physique en phase vapeur (PVD) d'espèces chimiques différentes pour chacun desdits groupes.

20

1/11

FIG. 1

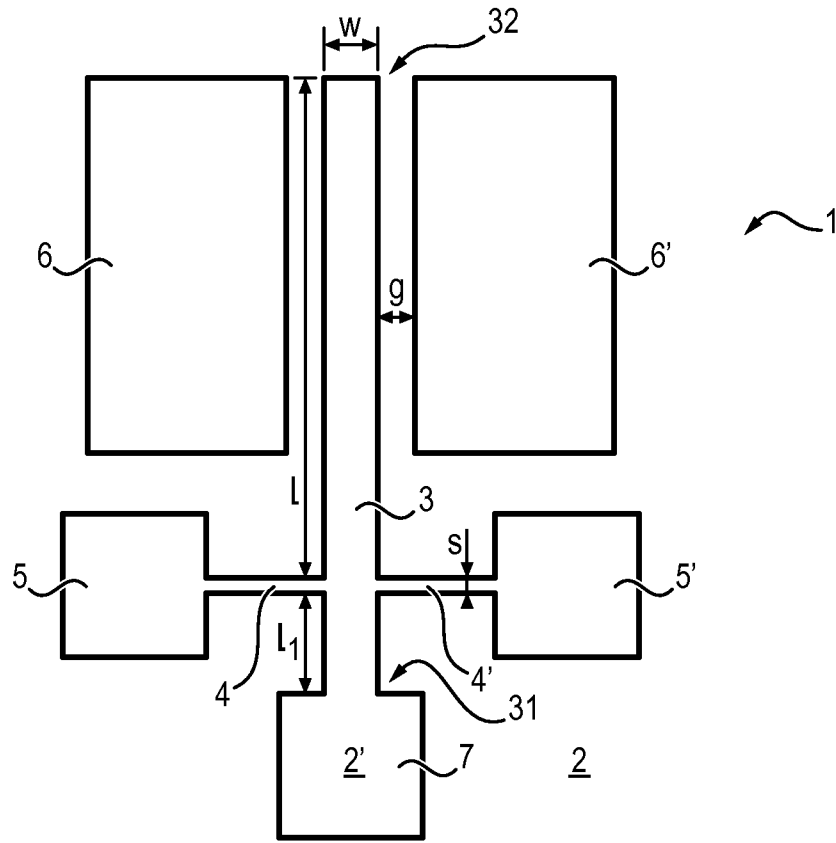


FIG. 2

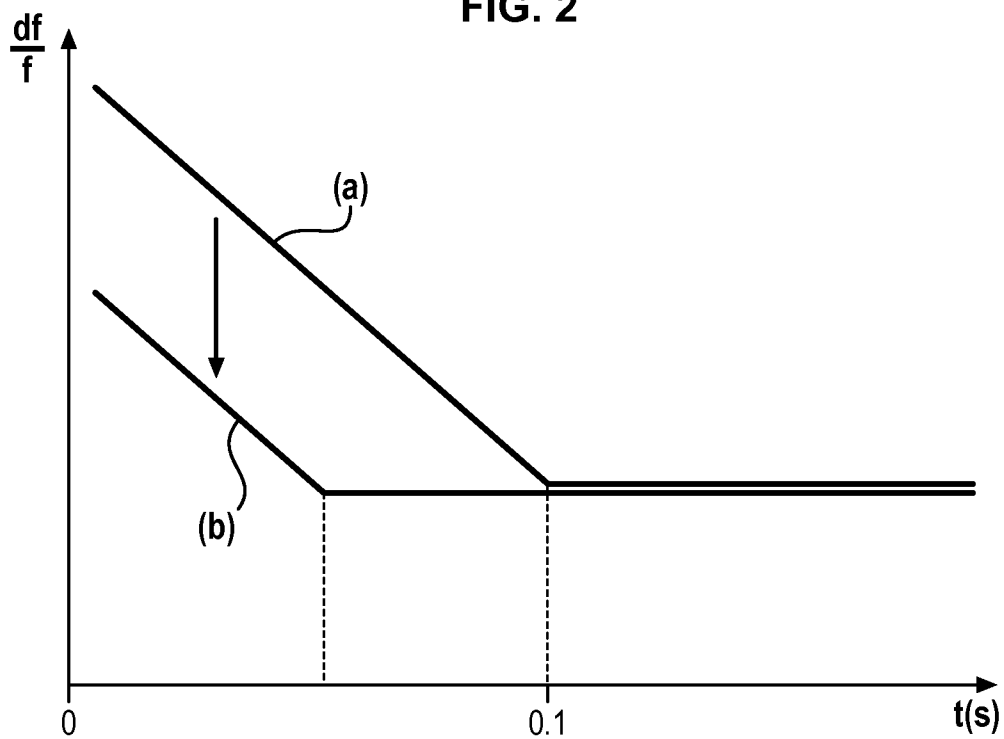


FIG. 3A

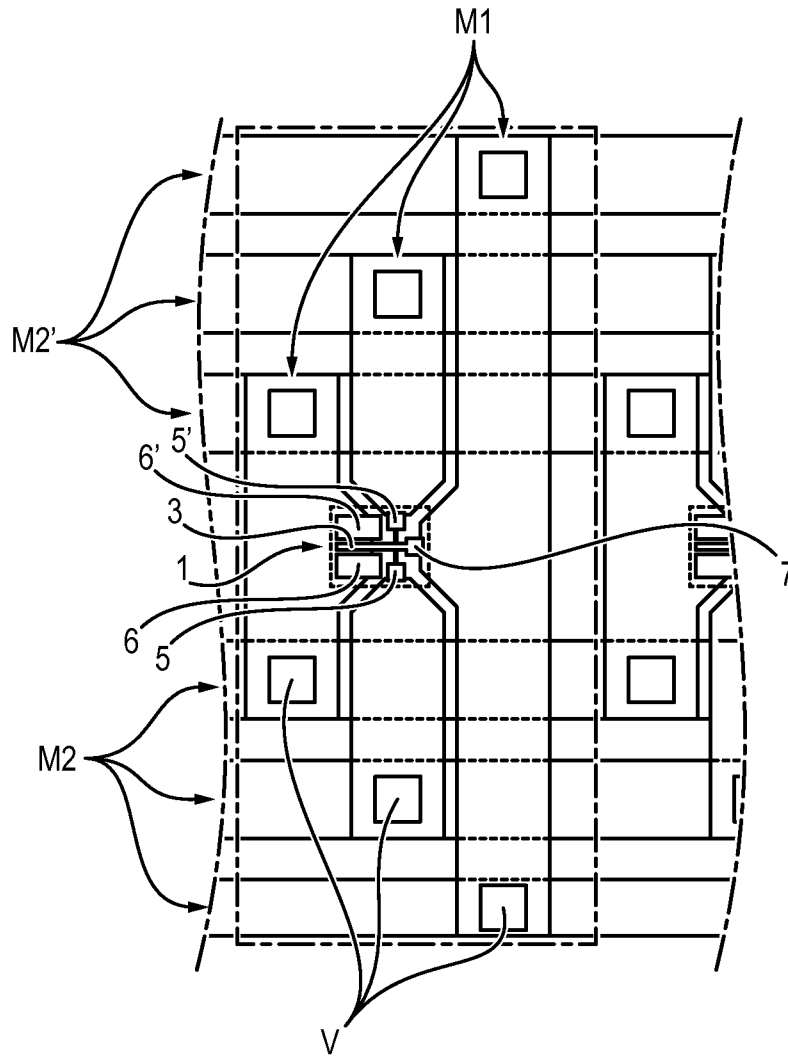


FIG. 3B

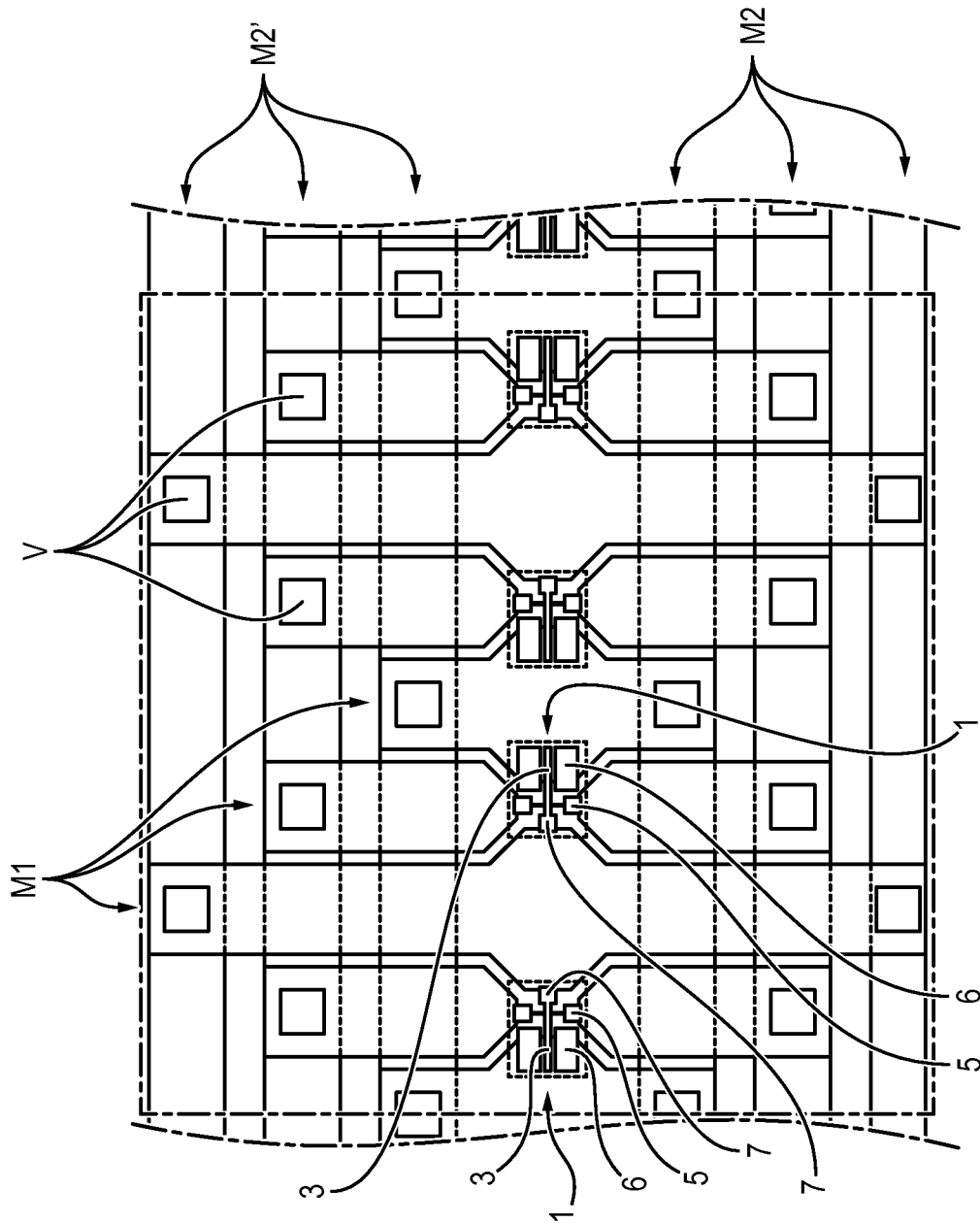


FIG. 4

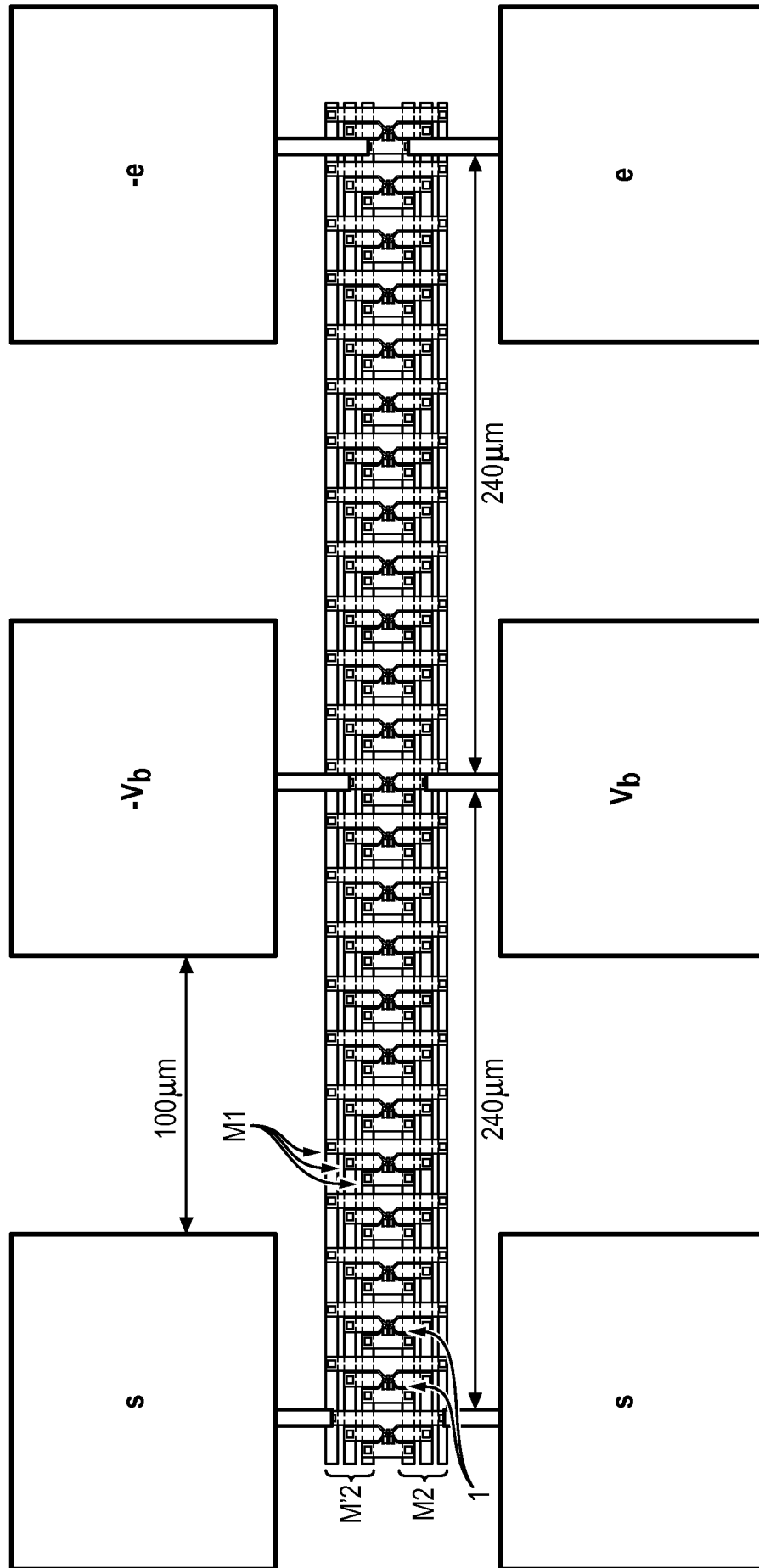
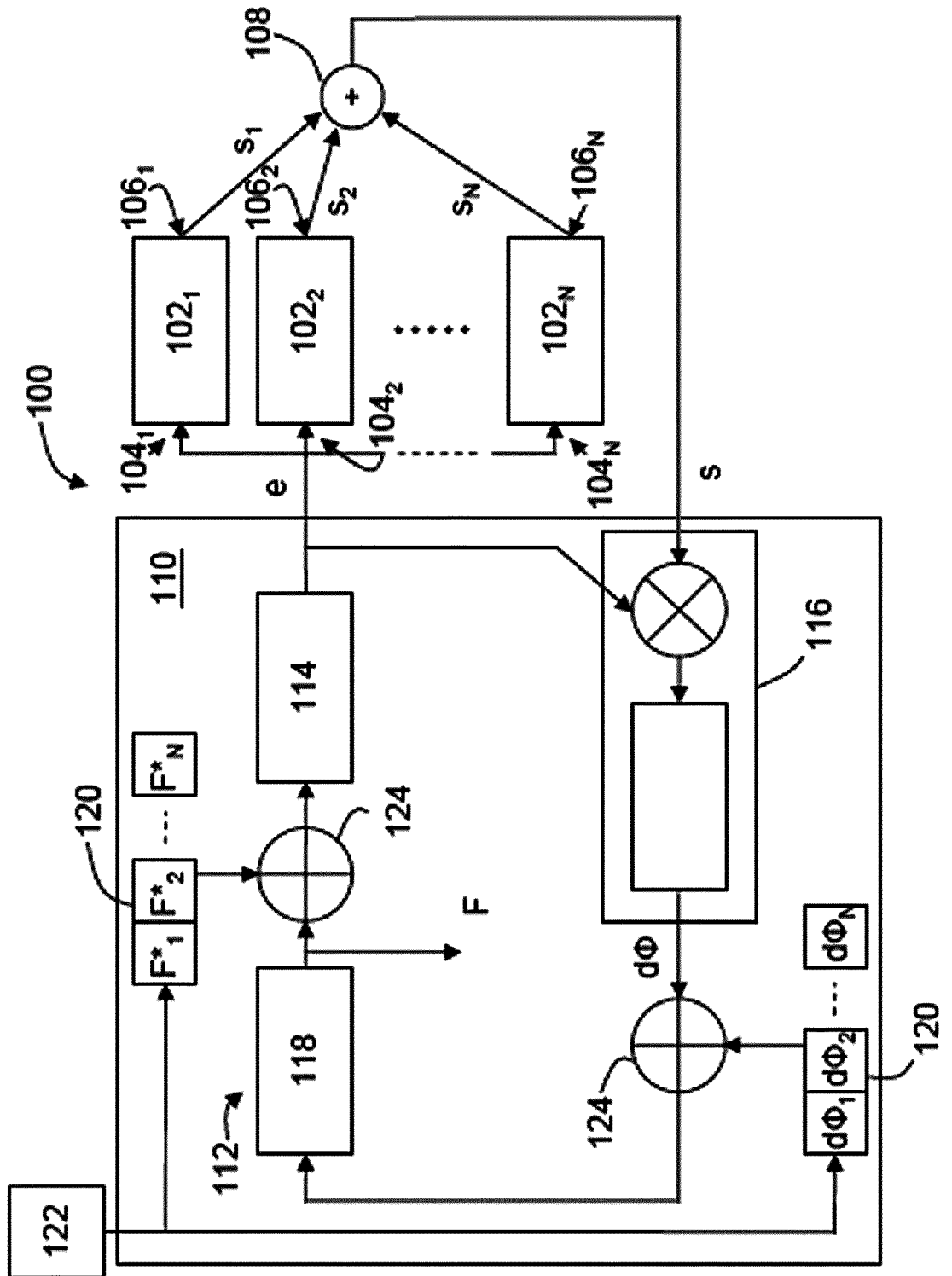




FIG. 6



7/11

FIG. 7

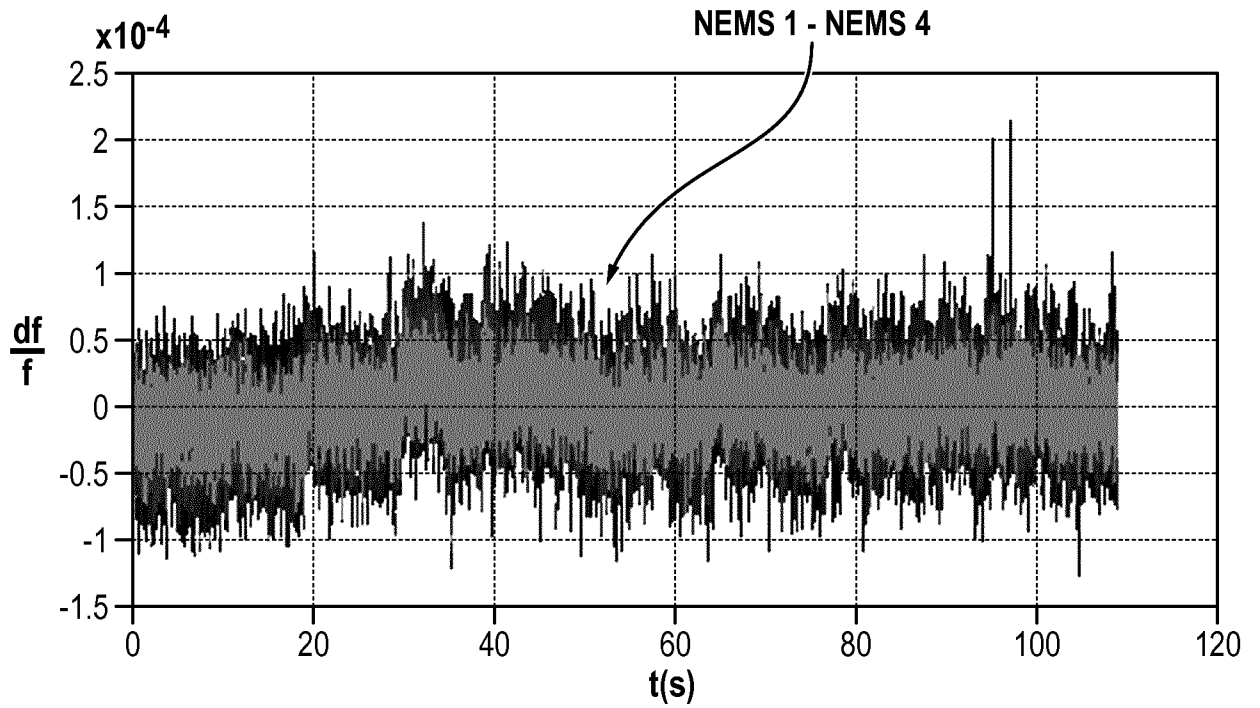
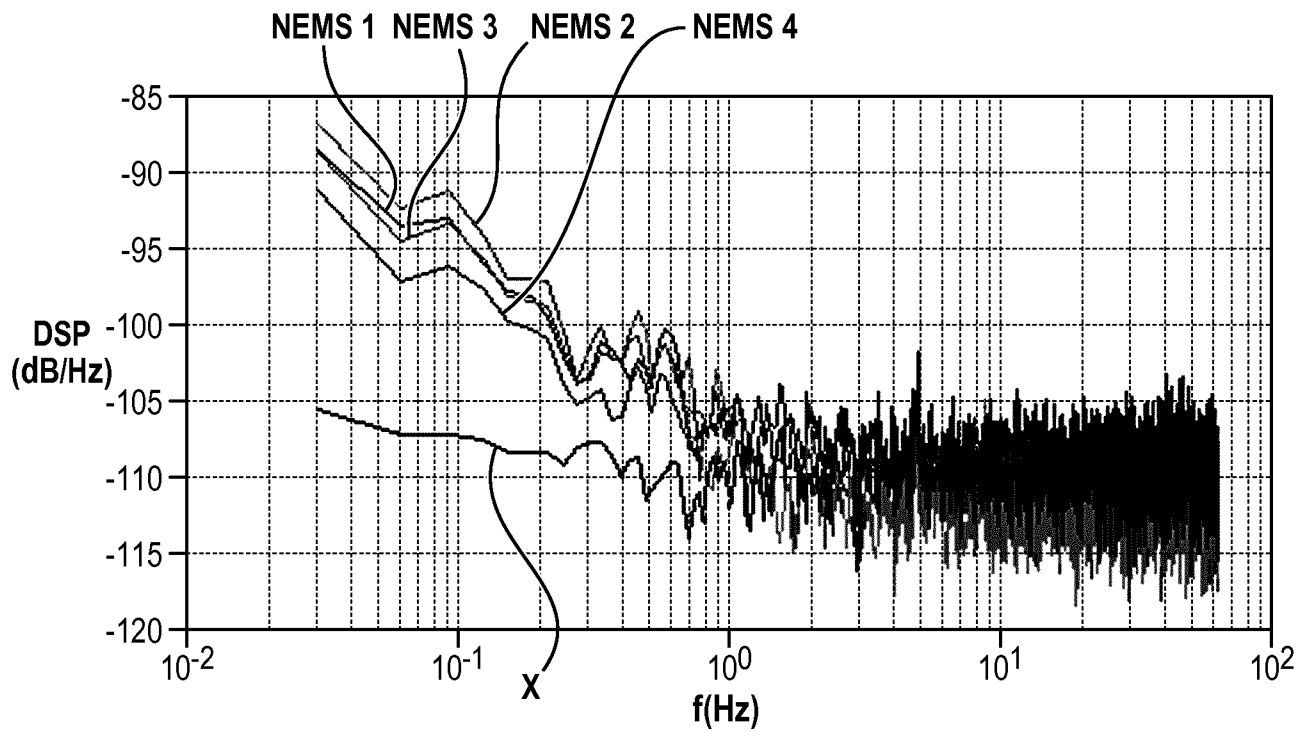


FIG. 8



8/11

FIG. 9

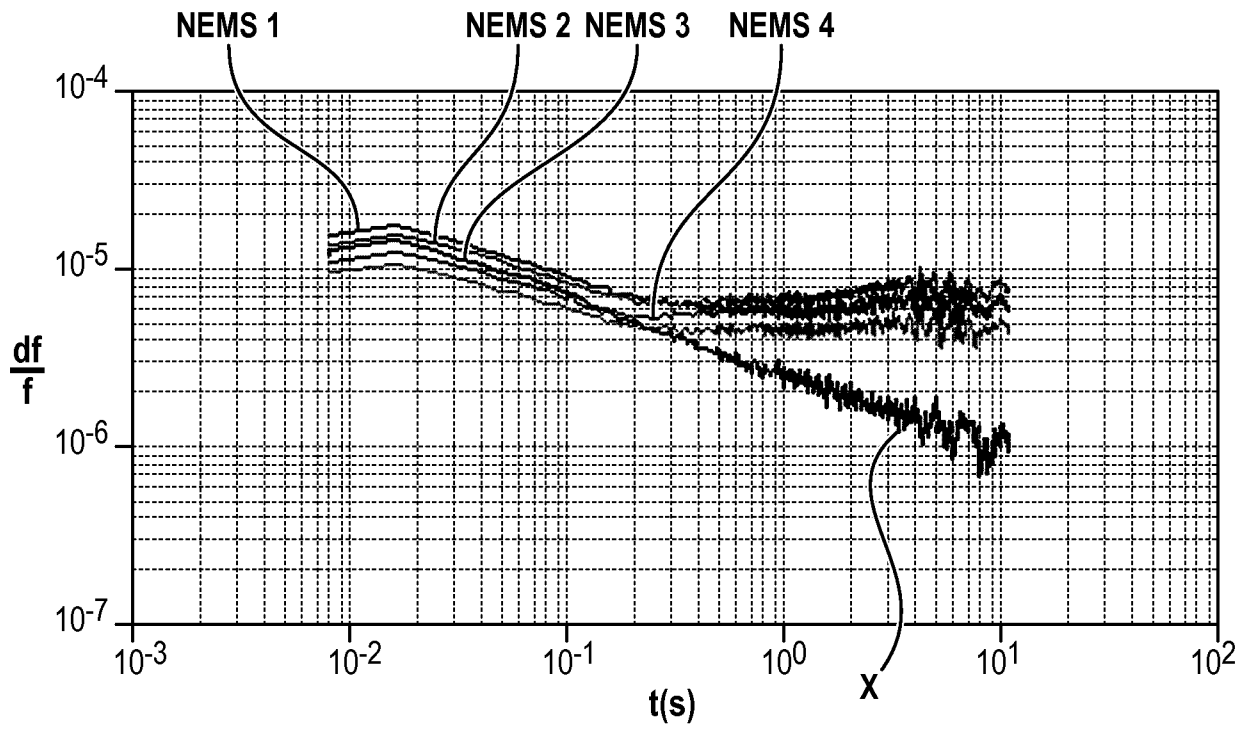
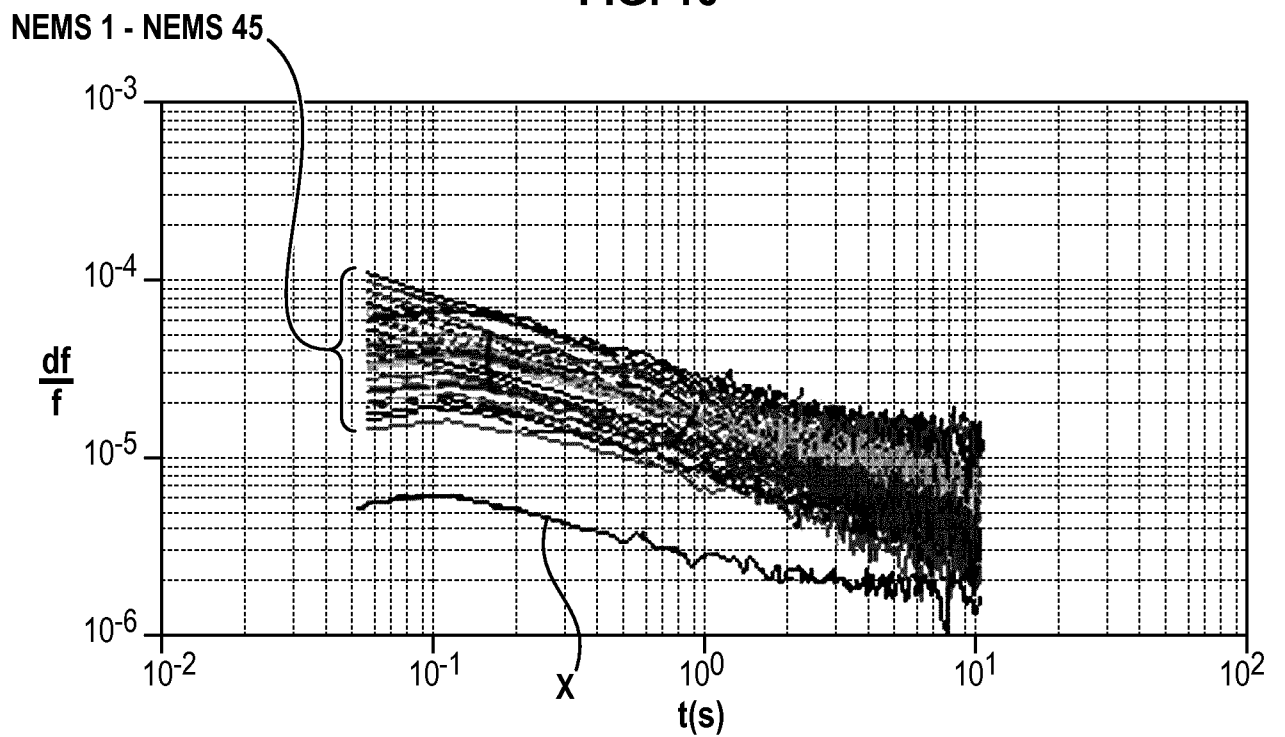


FIG. 10



# 9/11

FIG. 11

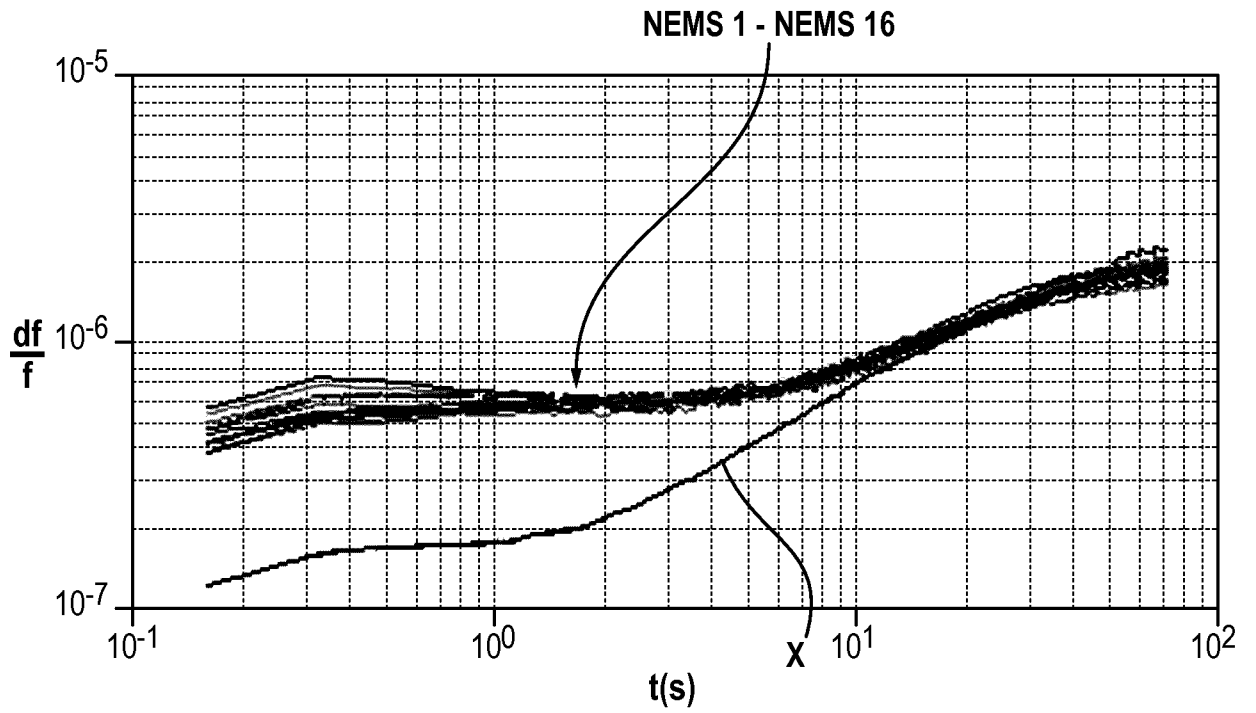
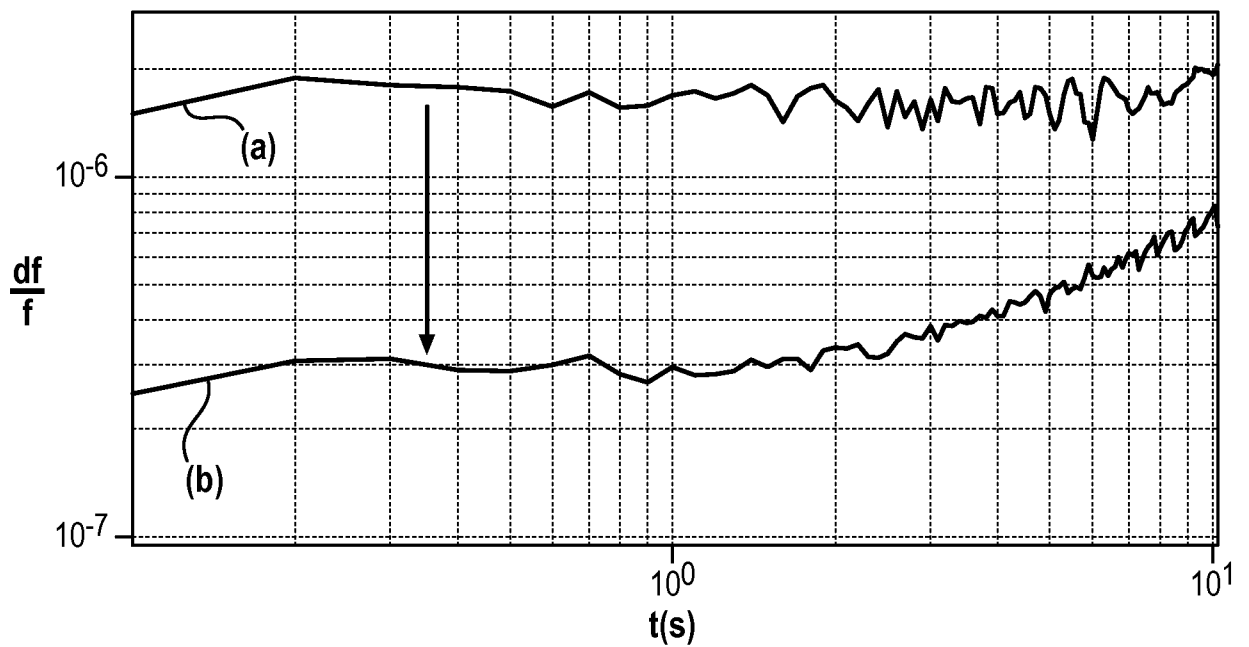


FIG. 12



10/11

FIG. 13A

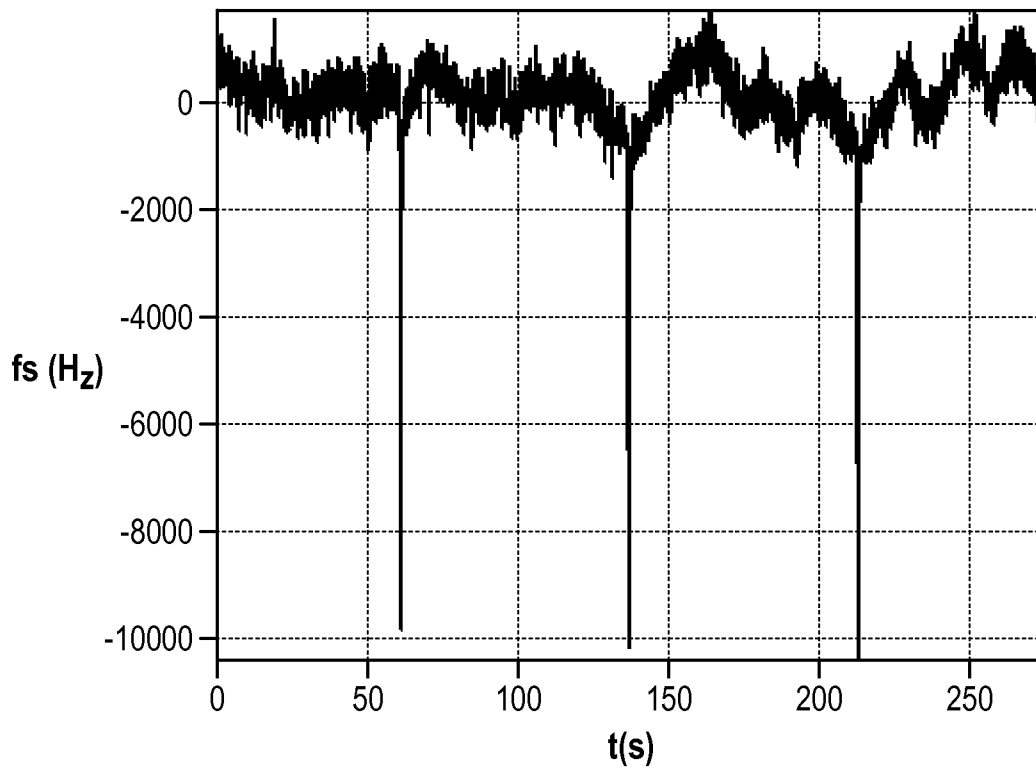


FIG. 13B

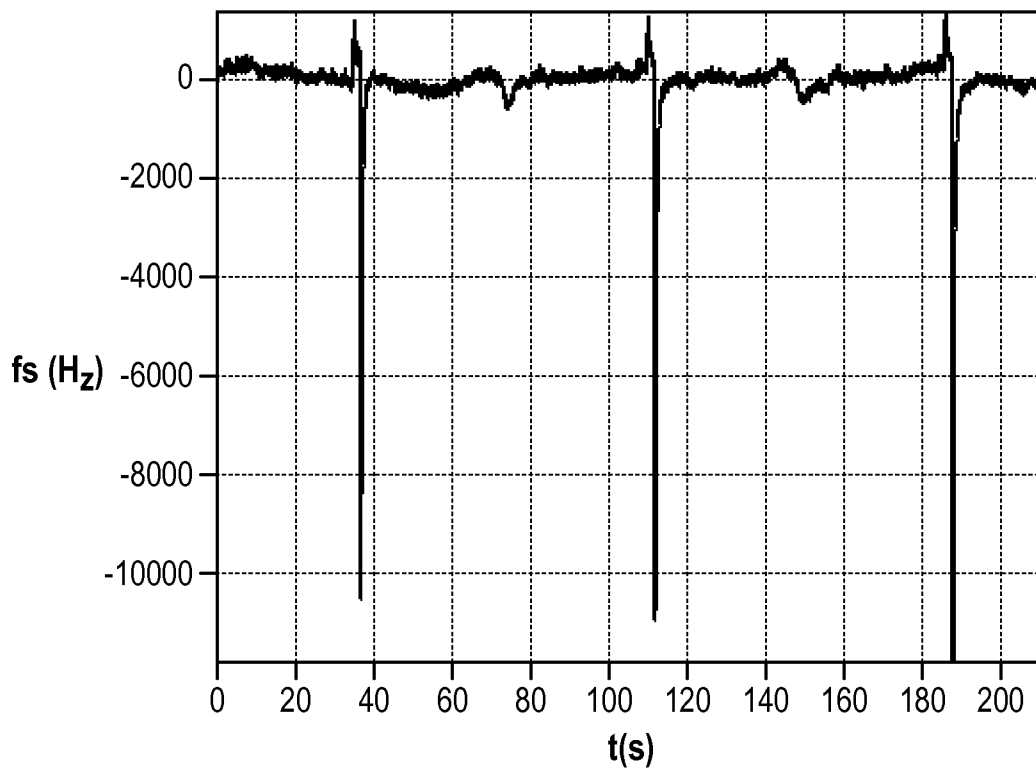
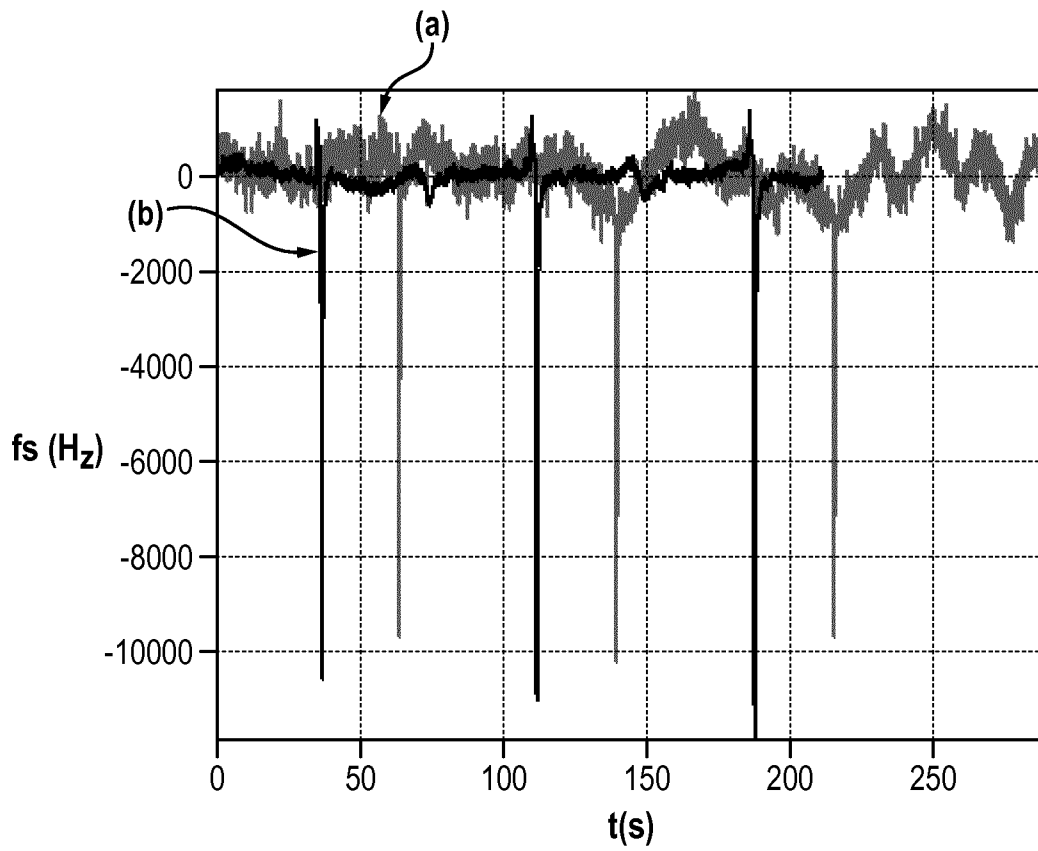


FIG. 13C



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No  
PCT/EP2013/070594

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
INV. G01N30/64 B81B7/04 G01L1/18 H03H3/007 H03H9/02  
ADD.  
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED  
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
G01N B81B G01L H03H  
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)  
EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 7 750 759 B1 (LEE SEUNGBAE [US] ET AL) 6 July 2010 (2010-07-06) claims 1,6,7,23 -----	1-18
A	US 2009/153258 A1 (LUTZ MARKUS [US] ET AL) 18 June 2009 (2009-06-18) page 30, lines 12-15; claim 1 page 39, lines 20-30 page 62, lines 32-35 -----	1-18
A	EP 2 008 965 A2 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 31 December 2008 (2008-12-31) cited in the application claims 1,5; figure 1 paragraph [0019] -----	1-18
	-/--	

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

\* Special categories of cited documents :

<p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>"&amp;" document member of the same patent family</p>
---	---

Date of the actual completion of the international search  30 October 2013	Date of mailing of the international search report  18/11/2013
--	--

Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer  Marembert, Vincent
--	--

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No  
PCT/EP2013/070594

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>I. BARGATIN ET AL: "Large-Scale Integration of Nanoelectromechanical Systems for Gas Sensing Applications", NANO LETTERS, vol. 12, no. 3, 14 March 2012 (2012-03-14), pages 1269-1274, XP055047111, ISSN: 1530-6984, DOI: 10.1021/nl2037479 cited in the application abstract</p> <p>-----</p>	1-18

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2013/070594

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 7750759	B1	06-07-2010	NONE
-----			
US 2009153258	A1	18-06-2009	CN 101946410 A 12-01-2011
			EP 2235822 A1 06-10-2010
			JP 5149970 B2 20-02-2013
			JP 2011507454 A 03-03-2011
			US 2009153258 A1 18-06-2009
			US 2011199167 A1 18-08-2011
			WO 2009079186 A1 25-06-2009
-----			
EP 2008965	A2	31-12-2008	EP 2008965 A2 31-12-2008
			FR 2917731 A1 26-12-2008
			JP 2009002953 A 08-01-2009
			US 2008314148 A1 25-12-2008
-----			

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°  
PCT/EP2013/070594

<b>A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE</b> INV. G01N30/64      B81B7/04      G01L1/18      H03H3/007      H03H9/02 ADD.				
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB				
<b>B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE</b> Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G01N B81B G01L H03H				
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche				
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data				
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS</b>				
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées		
A	US 7 750 759 B1 (LEE SEUNGBAE [US] ET AL) 6 juillet 2010 (2010-07-06) revendications 1,6,7,23 -----	1-18		
A	US 2009/153258 A1 (LUTZ MARKUS [US] ET AL) 18 juin 2009 (2009-06-18) page 30, ligne 12-15; revendication 1 page 39, ligne 20-30 page 62, ligne 32-35 -----	1-18		
A	EP 2 008 965 A2 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 31 décembre 2008 (2008-12-31) cité dans la demande revendications 1,5; figure 1 alinéa [0019] ----- -/--	1-18		
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; border: none;"><input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents</td> <td style="width: 50%; border: none;"><input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe</td> </tr> </table>			<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents	<input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe
<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents	<input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe			
* Catégories spéciales de documents cités:				
"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée	"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets			
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale			
30 octobre 2013	18/11/2013			
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale	Fonctionnaire autorisé			
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Marembert, Vincent			

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>I. BARGATIN ET AL: "Large-Scale Integration of Nanoelectromechanical Systems for Gas Sensing Applications", NANO LETTERS, vol. 12, no. 3, 14 mars 2012 (2012-03-14), pages 1269-1274, XP055047111, ISSN: 1530-6984, DOI: 10.1021/nl2037479 cité dans la demande abrégé</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-18

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2013/070594

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 7750759	B1	06-07-2010	AUCUN
-----			
US 2009153258	A1	18-06-2009	CN 101946410 A 12-01-2011
			EP 2235822 A1 06-10-2010
			JP 5149970 B2 20-02-2013
			JP 2011507454 A 03-03-2011
			US 2009153258 A1 18-06-2009
			US 2011199167 A1 18-08-2011
			WO 2009079186 A1 25-06-2009
-----			
EP 2008965	A2	31-12-2008	EP 2008965 A2 31-12-2008
			FR 2917731 A1 26-12-2008
			JP 2009002953 A 08-01-2009
			US 2008314148 A1 25-12-2008
-----			