

|                                     |                        |
|-------------------------------------|------------------------|
| <b>DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO</b> | <b>102021000023795</b> |
| <b>Data Deposito</b>                | <b>15/09/2021</b>      |
| <b>Data Pubblicazione</b>           | <b>15/03/2023</b>      |

Classifiche IPC

| Sezione | Classe | Sottoclasse | Gruppo | Sottogruppo |
|---------|--------|-------------|--------|-------------|
| G       | 01     | P           | 15     | 097         |

| Sezione | Classe | Sottoclasse | Gruppo | Sottogruppo |
|---------|--------|-------------|--------|-------------|
| G       | 01     | P           | 15     | 08          |

Titolo

ACCELEROMETRO RISONANTE AD ASSE Z CON STRUTTURA DI RILEVAMENTO AVENTE PRESTAZIONI MIGLIORATE

## DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"ACCELEROMETRO RISONANTE AD ASSE Z CON STRUTTURA DI RILEVAMENTO AVENTE PRESTAZIONI MIGLIORATE"

di 1) STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI 2

20864 AGRATE BRIANZA (MB)

di 2) POLITECNICO DI MILANO

di nazionalità italiana

con sede: PIAZZA LEONARDO DA VINCI, 32

20133 MILANO (MI)

Inventori: ZEGA Valentina, GATTERE Gabriele, FRANGI Attilio,  
OPRENI Andrea, RIANI Manuel

\* \* \*

La presente soluzione è relativa ad un accelerometro risonante ad asse verticale (cosiddetto "asse z") con struttura di rilevamento avente prestazioni migliorate.

Sono noti accelerometri MEMS - Micro Electro Mechanical System (intendendo compresi in tale definizione anche dispositivi con dimensioni sub-micrometriche), che operano con un principio di rilevamento in modulazione di frequenza (FM - Frequency Modulation) e sono in grado di rilevare una componente di accelerazione verticale, agente in direzione trasversale a, o al di fuori di, un piano di estensione

principale di una relativa struttura di rilevamento.

In tali accelerometri risonanti, l'accelerazione esterna da misurare produce una variazione rilevabile della frequenza di risonanza di uno o più elementi risonatori della struttura di rilevamento, mantenuti in oscillazione da un circuito di azionamento; l'elemento risonatore può essere costituito da un'intera massa inerziale (massa di prova, o massa libera, cosiddetta "proof mass") della struttura di rilevamento, o da un elemento distinto accoppiato alla stessa massa inerziale.

Il rilevamento risonante, rispetto ad altri principi di misura, ha il vantaggio di offrire una uscita di frequenza diretta, di tipo quasi-digitale, una elevata sensibilità, una elevata reiezione dei disturbi ed un'ampia dinamica. Inoltre, gli accelerometri risonanti presentano buone caratteristiche di integrabilità, dato che sono incapsulati in vuoto e lavorano a basse pressioni.

A seconda della configurazione della struttura di rilevamento, la variazione della frequenza di risonanza può essere indotta dalla presenza di sforzi assiali in un elemento risonatore e da una relativa variazione della rigidità meccanica ("mechanical stiffness"), o dalla variazione della cosiddetta "rigidità elettrostatica" ("electrostatic stiffness") a cui è soggetto lo stesso elemento risonatore.

Come mostrato schematicamente in Figura 1A, nel caso di accelerometri il cui funzionamento si basa sul rilevamento di una variazione della frequenza di risonanza dovuta ad una variazione di rigidità elettrica, un'accelerazione esterna  $a_{ext}$  agente in direzione verticale (lungo un asse  $z$ ) genera su una massa inerziale  $m$  della struttura di rilevamento (accoppiata elasticamente ad un supporto) una forza inerziale che induce uno spostamento della massa inerziale e varia una distanza, o "gap", tra la stessa massa inerziale ed un elemento risonatore  $r$  ad essa accoppiato. La variazione di gap produce una variazione di "rigidità elettrica", che causa una corrispondente variazione della frequenza di risonanza dell'elemento risonatore, mantenuto in oscillazione mediante una struttura di attuazione  $a$  (in generale, la variazione di gap, con la conseguente variazione di "rigidità elettrica", può avvenire anche tra l'elemento risonatore ed elettrodi ad esso accoppiati).

Come mostrato schematicamente in Figura 1B, nel caso di accelerometri il cui funzionamento si basa sul rilevamento di una variazione della frequenza di risonanza dovuta ad una variazione di rigidità meccanica, la suddetta accelerazione esterna  $a_{ext}$  genera sulla massa inerziale  $m$  della struttura di rilevamento una forza inerziale che induce uno spostamento della stessa massa inerziale, che determina uno sforzo assiale (di trazione o compressione) sull'elemento

risonatore r ad essa meccanicamente accoppiato, tale sforzo assiale essendo proporzionale alla suddetta accelerazione esterna.

Tra le soluzioni note di accelerometri risonanti basati su una variazione di rigidità elettrostatica si possono citare ad esempio:

B. Yang, X. Wang, B. Dai, X. Liu, "A new z axis resonant micro accelerometer based on electrostatic stiffness", Sensors, vol. 15, pp. 687 702, 2015;

C. Comi et al, "Sensitivity and temperature behavior of a novel z axis differential accelerometer", J. Micromech Microeng, vol. 26, 2016;

I. Kim et al, "Wafer Level vacuum packaged out of plane and in plane differential resonant silicon accelerometers for navigational applications" J. Semiconductor Tech. Sc., vol. 5, n. 1, pp 58-66, 2005; e

C. R. Marra , A. Tocchio , F. Rizzini , G. Langfelder, "Solving FSR versus offset drift tradeoffs with three axis time switched FM MEMS accelerometer" J. Microelectromech. Syst., vol. 27, n. 5, 2018.

Tra le soluzioni note di accelerometri risonanti basati su una variazione di rigidità meccanica si possono citare ad esempio:

J. Wang, Y. Shang, J. Chen, Z. Sun, D. Chen, "Micro machined resonant out of plane accelerometer with a

differential structure fabricated by silicon on insulator mems technology", Micro & Nano Letters, vol. 7(12), pp. 1230-1233, 2012; e

S. M. Zhao, Y. F. Liu, J. X. Dong, "A novel micro machined out of plane resonant accelerometer with differential structure of different height resonant beams", Key Engineering Materials vol. 645, pp 488-491, 2015.

Ulteriori accelerometri risonanti di tipo noto sono descritti ad esempio in: US 8 468 887 B2; US 2019/0277634 A1; US 9 377 482 B2; e US 8 671 756 B2.

La presente Richiedente ha constatato che le attuali soluzioni di accelerometri risonanti ad asse z presentano in ogni caso alcuni inconvenienti, tra cui: una ridotta sensibilità; un elevato ingombro (cosiddetto "footprint"); una limitata capacità di reiezione dei disturbi; una limitata dinamica; ed una ridotta linearità.

Nessuno dei succitati accelerometri risonanti risulta dunque completamente soddisfacente per quanto riguarda le caratteristiche elettriche e le dimensioni meccaniche, principalmente nel caso di applicazioni portatili in cui si richiedono consumi e dimensioni particolarmente ridotti.

Lo scopo della presente invenzione è pertanto quello di fornire una struttura di rilevamento per un accelerometro risonante ad asse z, avente migliorate caratteristiche meccaniche ed elettriche, in particolare per quanto riguarda

la sensibilità nel rilevamento dell'accelerazione esterna e le risultanti dimensioni.

Secondo la presente soluzione viene fornito un accelerometro risonante ad asse verticale, come definito nelle rivendicazioni allegate.

Per una migliore comprensione della presente invenzione ne vengono ora descritte forme di realizzazione preferite, a puro titolo di esempio non limitativo, con riferimento ai disegni allegati, nei quali:

- le Figure 1A e 1B sono rappresentazioni schematiche di accelerometri risonanti basati, rispettivamente, su una variazione di rigidità elettrostatica e su una variazione di rigidità meccanica;

- la Figura 2 è una vista in pianta schematica di una struttura di rilevamento di un accelerometro risonante ad asse verticale, secondo la presente soluzione;

- la Figura 3 è una vista in pianta prospettica di una forma di realizzazione della struttura di rilevamento di Figura 2;

- la Figura 4 è una vista in pianta prospettica di una porzione ingrandita della struttura di rilevamento di Figura 3;

- le Figure 5A e 5B sono, rispettivamente, una vista in pianta prospettica ed una vista in sezione di una ulteriore porzione della struttura di rilevamento di Figura 3;

- le Figure 6A e 6B sono viste in sezione della porzione della struttura di rilevamento di Figura 3;

- la Figura 7 mostra schematicamente la deformazione di un elemento risonatore della struttura di rilevamento;

- la Figura 8 mostra schematicamente la rotazione di una massa inerziale della struttura di rilevamento per effetto di una accelerazione esterna; e

- la Figura 9 è uno schema a blocchi semplificato di un accelerometro risonante incorporante la struttura di rilevamento, e di un apparecchio elettronico provvisto di tale accelerometro risonante.

Le Figure 2 e 3 mostrano, rispettivamente in maniera schematica e maggiormente dettagliata, una forma di realizzazione di una struttura di rilevamento, indicata nel suo insieme con 1, di un accelerometro risonante ad asse verticale (asse  $z$ ). La struttura di rilevamento 1 è realizzata in maniera integrata, con le tecniche di microlavorazione superficiale dei semiconduttori, in particolare a partire da un corpo di materiale semiconduttore (quale il silicio).

Le Figure 4, 5A-5B e 6A-6B mostrano in maniera dettagliata porzioni della struttura di rilevamento 1, per agevolare la comprensione di quanto verrà nel seguito descritto.

La struttura di rilevamento 1 comprende una massa

inerziale 2, avente un'estensione principale, nell'esempio con una forma genericamente rettangolare, in un piano orizzontale  $xy$ , definito da un primo e da un secondo asse orizzontale  $x$ ,  $y$ ; la massa inerziale 2 presenta un primo spessore  $w_1$  (mostrato in Figura 3) in direzione ortogonale allo stesso piano  $xy$ , lungo un asse verticale (asse  $z$ ) definente una terna di assi ortogonali con i suddetti primo e secondo asse orizzontale  $x$ ,  $y$ . L'asse  $z$  definisce inoltre la direzione di rilevamento di un'accelerazione esterna da parte della struttura di rilevamento 1.

La massa inerziale 2 è ancorata ad un sottostante substrato 8 (illustrato in Figura 6A ed in Figura 6B), ad esempio un substrato di materiale semiconduttore, quale il silicio), in modo da essere sospesa al di sopra dello stesso substrato 8, con il piano  $xy$  sostanzialmente parallelo ad una superficie superiore dello stesso substrato 8, in condizione di riposo (ovvero in assenza dell'accelerazione esterna).

La massa inerziale 2 è accoppiata elasticamente ad un unico ancoraggio principale 4 disposto internamente all'ingombro della stessa massa inerziale 2 nel piano  $xy$ ; l'ancoraggio principale 4 è ad esempio costituito da un pilastro che si estende verticalmente verso il substrato 8 ed è accoppiato meccanicamente e solidalmente allo stesso substrato 8 mediante una regione di accoppiamento 9 (si

vedano nuovamente le suddette Figure 6A e 6B).

L'ancoraggio principale 4 è disposto in una finestra 5, realizzata all'interno della massa inerziale 2 e che la attraversa per il suo intero spessore; lo stesso ancoraggio principale 4 presenta ad esempio una forma sostanzialmente quadrata o rettangolare nel piano orizzontale xy.

La massa inerziale 2 è collegata al suddetto ancoraggio principale 4 mediante un primo ed un secondo elemento elastico 6a, 6b, con estensione longitudinale ed allineati nell'esempio lungo il secondo asse orizzontale y, da parti opposte dello stesso ancoraggio principale 4.

I suddetti primo e secondo elemento elastico 6a, 6b presentano anch'essi il primo spessore  $w_1$  lungo l'asse verticale z (come mostrato nelle Figure 5A-5B e 6A-6B).

In particolare, il primo ed il secondo elemento elastico 6a, 6b sono di tipo torsionale (ovvero presentano elevata rigidità a flessione e sono cedevoli a torsione) e sono configurati in modo da mantenere la massa inerziale 2 sospesa al di sopra del substrato 8 e da consentirne un movimento di rotazione al di fuori del piano xy, intorno ad un asse di rotazione A, diretto parallelamente al secondo asse orizzontale y e definito dall'asse di estensione degli stessi primo e secondo elemento elastico 6a, 6b; tale movimento costituisce, come del resto discusso anche in seguito, il primo modo proprio della massa inerziale 2.

In particolare, la massa inerziale 2 presenta una distribuzione di massa asimmetrica rispetto al primo asse di rotazione A, in modo tale da essere vincolata in maniera eccentrica all'ancoraggio principale 4, tramite i suddetti elementi elastici 6a, 6b; la massa inerziale 2 presenta infatti una distribuzione di massa asimmetrica lungo il primo asse orizzontale x, nell'esempio con una prima porzione 2a, ed una seconda porzione 2b, disposte da parti opposte rispetto all'asse di rotazione A, la prima porzione 2a avendo una estensione lungo il primo asse orizzontale x maggiore rispetto alla seconda porzione 2b.

La struttura di rilevamento 1 comprende inoltre un primo ed un secondo elemento risonatore 10a, 10b, disposti nella finestra 5, in particolare rispettivamente in una prima ed in una seconda metà 5a, 5b in cui tale finestra 5 è suddivisa dall'asse di rotazione A, tali prima e seconda metà 5a, 5b essendo simmetriche rispetto ad un centro O dell'ancoraggio principale 4.

In altre parole, il primo elemento risonatore 10a è disposto internamente alla massa inerziale 2, all'interno della prima metà 5a della finestra 5, realizzata attraverso la prima porzione 2a della massa inerziale 2; mentre il secondo elemento risonatore 10b è disposto all'interno della seconda metà 5b della finestra 5, realizzata attraverso la seconda porzione 2b della stessa massa inerziale 2.

Il primo ed il secondo elemento risonatore 10a, 10b presentano estensione lineare simmetricamente rispetto al suddetto centro 0, nell'esempio lungo il primo asse orizzontale x (con dimensione molto minore lungo il secondo asse orizzontale y, essendo dunque "sottili" nel piano orizzontale xy) e sono costituiti da una rispettiva trave (beam) ancorata ad entrambe le estremità (gli elementi risonatori sono del tipo cosiddetto "clamped-clamped").

In dettaglio, una rispettiva prima estremità del primo e del secondo elemento risonatore 10a, 10b è accoppiata al primo, rispettivamente, al secondo elemento elastico 6a, 6b, in prossimità dell'ancoraggio principale 4; in particolare, il punto di accoppiamento tra tale rispettiva prima estremità ed il rispettivo primo o secondo elemento elastico 6a, 6b si trova ad una prima distanza  $d_1$  (considerata lungo il secondo asse orizzontale y e lungo l'estensione longitudinale dello stesso elemento elastico) dall'ancoraggio principale 4 e ad una seconda distanza  $d_2$  dalla massa inerziale 2, la prima distanza  $d_1$  essendo minore, nell'esempio illustrato molto minore, della seconda distanza  $d_2$ .

Una rispettiva seconda estremità del primo e del secondo elemento risonatore 10a, 10b è inoltre accoppiata ad un primo, rispettivamente secondo, elemento di vincolo 12a, 12b, sospeso al di sopra del substrato 8. Ad esempio, tali primo e secondo elemento di vincolo 12a, 12b presentano una

forma sostanzialmente rettangolare o quadrata nel piano orizzontale  $xy$  ed uno spessore corrispondente al suddetto primo spessore  $w_1$  (come mostrato nella Figura 4 e nelle Figure 6A e 6B).

I suddetti primo e secondo elemento di vincolo 12a, 12b sono accoppiati solidalmente al substrato 8, in maniera indiretta, mediante un primo, rispettivamente secondo, elemento ausiliario di ancoraggio 14a, 14b che si estendono al di sotto del primo, rispettivamente secondo, elemento risonatore 10a, 10b (si vedano ad esempio le suddette Figure 4, 5A-5B e 6A-6B).

Tali elementi ausiliari di ancoraggio 14a, 14b presentano estensione longitudinale lungo il primo asse orizzontale  $x$  e sono accoppiati in maniera integrata al rispettivo primo, secondo elemento di vincolo 12a, 12b ed inoltre all'ancoraggio principale 4 (essendo dunque interposti a contatto tra il relativo elemento di vincolo e lo stesso ancoraggio principale 4).

In dettaglio, il primo ed il secondo elemento risonatore 10a, 10b presentano un secondo spessore  $w_2$  lungo l'asse  $z$  (si vedano le suddette Figure 5A-5B e 6A-6B), minore rispetto al primo spessore  $w_1$ , in particolare minore o uguale della metà di tale primo spessore  $w_1$  e sono accoppiati solidalmente al rispettivo primo, secondo elemento elastico 6a, 6b ed al rispettivo primo, secondo elemento di vincolo 12a, 12b in

corrispondenza di una loro rispettiva porzione superiore (ovvero, posta a maggiore distanza lungo l'asse  $z$  rispetto al sottostante substrato 8).

I suddetti primo e secondo elemento ausiliario di ancoraggio 14a, 14b sono dunque disposti al di sotto del primo, rispettivamente secondo, elemento risonatore 10a, 10b, interposti tra lo stesso elemento risonatore ed il substrato 8. Tali elementi ausiliari di ancoraggio 14a, 14b presentano inoltre un terzo spessore  $w_3$ , il suddetto primo spessore  $w_1$  corrispondendo alla somma del secondo spessore  $w_2$  e di tale terzo spessore  $w_3$  ed inoltre di un primo gap  $g_1$ , presente (si vedano le Figure 5B e 6A-6B) tra i suddetti primo e secondo elemento ausiliario di ancoraggio 14a, 14b ed il primo e secondo elemento risonatore 10a, 10b.

Come mostrato nelle Figure 6A-6B, è inoltre presente un secondo gap  $g_2$ , nell'esempio maggiore del primo gap  $g_1$ , tra gli stessi primo e secondo elemento ausiliario di ancoraggio 14a, 14b ed il sottostante substrato 8.

In altre parole, il primo ed il secondo elemento ausiliario di ancoraggio 14a, 14b sono disposti in maniera "flottante" rispetto al substrato 8 ed al rispettivo primo o secondo elemento risonatore 10a, 10b.

Gli stessi primo e secondo elemento ausiliario di ancoraggio 14a, 14b sono dunque accoppiati solidalmente al rispettivo primo o secondo elemento di vincolo 12a, 12b ed

all'ancoraggio principale 4 in corrispondenza di relative porzioni inferiore (ovvero, poste a minore distanza, o in prossimità, lungo l'asse z rispetto al sottostante substrato 8).

La struttura di rilevamento 1 comprende inoltre, per ciascun elemento risonatore 10a, 10b, una rispettiva coppia di elettrodi di azionamento 21, disposti da parti opposte del rispettivo elemento risonatore 10a, 10b (lungo il secondo asse orizzontale y) in configurazione cosiddetta "parallel plate", nell'esempio centralmente rispetto all'estensione longitudinale dello stesso elemento risonatore (e della relativa metà 5a, 5b della finestra 5).

Tali elettrodi di azionamento 21 sono utilizzati per azionare (mediante uno schema di azionamento noto come "push-pull") l'associato elemento risonatore 10a, 10b in condizione di oscillazione di risonanza, mediante l'applicazione di un'opportuna differenza di potenziale elettrico; ad esempio, l'elemento risonatore 10a, 10b può essere posto ad una tensione di polarizzazione costante, di riferimento, mentre gli associati elettrodi di azionamento 21 possono essere posti ad una tensione di azionamento variabile nel tempo, ad esempio con andamento sinusoidale, in modo tale da indurre un movimento oscillante in risonanza dello stesso elemento risonatore 10a, 10b.

Tale azionamento in risonanza degli elementi risonatori

10a, 10b è indotto in maniera continua, indipendentemente dalla rotazione della massa inerziale 2 dovuta alla presenza dell'accelerazione esterna da rilevare.

A questo riguardo, la Figura 7 mostra il movimento di oscillazione in risonanza di un elemento risonatore, nell'esempio il primo elemento risonatore 10a, che corrisponde al relativo primo modo di flessione nel piano orizzontale xy.

La struttura di rilevamento 1 comprende inoltre, per ciascun elemento risonatore 10a, 10b, due rispettive coppie di elettrodi di rilevamento 22, disposti da parti opposte degli elettrodi di azionamento 21 lungo il primo asse orizzontale x ed anch'essi affacciati da parti opposte del rispettivo elemento risonatore 10a, 10b (lungo il secondo asse orizzontale y) in una configurazione "parallel plate".

Come mostrato ad esempio in Figura 4, tali elettrodi di rilevamento 22 presentano un'estensione longitudinale lungo il primo asse orizzontale x, parallelamente al rispettivo elemento risonatore 10a, 10b.

Gli elettrodi di rilevamento 22 sono configurati in modo da rilevare, mediante una variazione dell'accoppiamento capacitivo con il rispettivo elemento risonatore 10a, 10b, variazioni della relativa frequenza di risonanza (vantaggiosamente, secondo uno schema di rilevamento differenziale).

Gli elettrodi di azionamento 21 e gli elettrodi di rilevamento 22 presentano (si vedano le Figure 4, 5A-5B e 6A) il secondo spessore  $w_2$  lungo l'asse  $z$  e sono disposti al di sopra del relativo primo o secondo elemento ausiliario di ancoraggio 14a, 14b; inoltre, ciascuno dei suddetti elettrodi di azionamento 21 ed elettrodi di rilevamento 22 presenta una porzione di ancoraggio 21', 22', che si estende fino al substrato 8, accoppiandosi meccanicamente allo stesso substrato 8, disposta esternamente o lateralmente (nel piano orizzontale  $xy$ ) rispetto al relativo elemento ausiliario di ancoraggio 14a, 14b.

In particolare, le suddette porzioni di ancoraggio 21', 22' sono disposte centralmente rispetto all'estensione longitudinale del relativo elemento risonatore 10a, 10b (e della relativa metà 5a, 5b della finestra 5), in prossimità reciproca e presentano dimensioni ridotte, in modo tale da minimizzare gli effetti sugli stessi elettrodi di eventuali spostamenti del substrato 8 dovuti a stress residui meccanici e/o termici.

Come mostrato ad esempio nelle suddette Figure 3 e 4, gli elettrodi di rilevamento 22 presentano inoltre internamente dei fori, in modo da ridurre l'accoppiamento capacitivo con il sottostante relativo elemento ausiliario di ancoraggio 14a, 14b.

In uso, e come mostrato schematicamente in Figura 8, in

risposta ad una accelerazione esterna  $a_{\text{ext}}$  agente lungo l'asse  $z$ , la massa inerziale 2 ruota intorno all'asse di rotazione A secondo il suo primo modo torsionale; tale rotazione viene convertita in un carico assiale sugli elementi risonatori 10a, 10b, grazie in particolare al ridotto spessore degli elementi risonatori rispetto agli elementi elastici 6a, 6b e rispetto alla massa inerziale 2 (ed inoltre all'accoppiamento degli stessi elementi risonatori in corrispondenza della sola porzione superiore degli stessi elementi elastici 6a, 6b).

Si origina così uno sforzo di trazione o elongazione su uno di tali elementi risonatori (nell'esempio raffigurato, nel primo elemento risonatore 10a) ed un corrispondente sforzo di compressione nell'altro elemento risonatore (nell'esempio raffigurato, nel secondo elemento risonatore 10b).

Per effetto della conseguente variazione di rigidezza meccanica, si verifica dunque una variazione differenziale della frequenza di risonanza dei suddetti elementi risonatori 10a, 10b (nell'esempio, la frequenza di risonanza del primo elemento risonatore 10a aumenta, mentre la frequenza di risonanza del secondo elemento risonatore 10b subisce un corrispondente decremento).

L'accelerazione esterna  $a_{\text{ext}}$  può dunque essere misurata mediante il rilevamento delle suddette variazioni di

frequenza degli elementi risonatori 10a, 10b.

Come mostrato schematicamente in Figura 9, la struttura di rilevamento 1 è convenientemente accoppiata ad un opportuno circuito elettronico di lettura e azionamento 30, configurato in modo tale da effettuare opportune elaborazioni e combinazioni dei valori di frequenza di risonanza dei suddetti primo e secondo elemento risonatore 10a, 10b (in particolare in modo da eseguire una differenza di tali valori), per determinare il valore dell'accelerazione esterna  $a_{ext}$ .

La struttura di rilevamento 1 e l'associato circuito elettronico di lettura e azionamento 30 formano insieme un accelerometro risonante 32, ad asse verticale; il circuito elettronico di lettura 30 è convenientemente realizzato in forma integrata come ASIC (Application Specific Integrated Circuit), in una piastrina (die) che può essere vantaggiosamente alloggiata in uno stesso contenitore (package) che ospita anche la piastrina nella quale è realizzata la struttura di rilevamento 1.

Come mostrato schematicamente nella stessa Figura 9, un apparecchio elettronico 34, provvisto di tale accelerometro risonante 32, ad esempio un apparecchio portatile, quale uno smartphone, un tablet, un palmare, un laptop, un orologio o braccialetto elettronico, una fotocamera o videocamera, comprende inoltre un'unità di controllo 36 (ad esempio a

microprocessore), collegata elettricamente al circuito elettronico di lettura e azionamento 30, in modo da ricevere le misure dell'accelerazione esterna  $a_{ext}$  per eseguire operazioni di controllo per la gestione dello stesso apparecchio elettronico 34.

Si sottolinea che la presenza dei due elementi risonatori 10a, 10b sottoposti a variazioni opposte della frequenza di risonanza fornisce diversi vantaggi, tra cui:

- la sensibilità nel rilevamento dell'accelerazione esterna  $a_{ext}$  risulta raddoppiata misurando la differenza tra la frequenza dei due elementi risonatori, anziché la variazione di frequenza di un singolo elemento risonatore;

- la linearità del sistema viene migliorata, ovvero la risposta dell'accelerometro può essere linearizzata in una gamma maggiore di accelerazioni.

Tuttavia, si evidenzia che una differente forma di realizzazione della struttura di rilevamento 1 potrebbe includere anche uno soltanto di tali elementi risonatori, ad esempio il primo elemento risonatore 10a.

La suddetta struttura di rilevamento 1 può essere vantaggiosamente realizzata con processi noti di microlavorazione superficiale dei materiali semiconduttori, per esempio utilizzando il cosiddetto processo ThELMA (Thick Epipoly Layer for Microactuators and Accelerometers).

In generale, il processo ThELMA consente la

realizzazione di strutture sospese con spessori relativamente contenuti (ad esempio dell'ordine di 20-30  $\mu\text{m}$ ), ancorate ad un substrato attraverso parti cedevoli (molle) e pertanto in grado di spostarsi, ad esempio per effetto inerziale, rispetto al substrato di silicio sottostante. Il processo consiste in diverse fasi di produzione, tra cui:

- ossidazione termica del substrato;
- deposizione e modellazione (patterning) di interconnessioni elettriche orizzontali;
- deposizione e patterning di uno strato sacrificale, in particolare di ossido di silicio;
- crescita epitassiale di un primo strato strutturale (ad esempio costituito di polisilicio, destinato alla formazione delle masse sospese);
- patterning dello strato strutturale mediante attacco a trincea (trench etching);
- rimozione dell'ossido sacrificale per il rilascio delle varie masse sospese; e
- deposizione di metallizzazioni di contatto.

In particolare, per la realizzazione della struttura di rilevamento 1 può essere convenientemente realizzato un doppio processo ThELMA, con la crescita epitassiale di un ulteriore strato strutturale al di sopra del primo strato strutturale realizzato epitassialmente sul substrato.

Nel caso specifico, il suddetto secondo spessore  $w_2$  può sostanzialmente corrispondere allo spessore di tale ulteriore strato strutturale, il suddetto terzo spessore  $w_3$  può sostanzialmente corrispondere allo spessore di tale primo strato strutturale, mentre il suddetto primo spessore  $w_1$  può sostanzialmente corrispondere alla somma degli spessori dello stesso ulteriore strato strutturale e del primo strato strutturale (considerando inoltre il suddetto primo gap  $g_1$ ).

Opportune trincee possono essere aperte per la realizzazione degli elementi costitutivi la struttura di rilevamento 1, attraverso il solo ulteriore strato strutturale o attraverso entrambi gli strati strutturali, fino a raggiungere il substrato.

Come illustrato ad esempio nella Figura 3, fori sono praticati attraverso l'intero spessore della massa inerziale 2 (e degli altri elementi realizzati), al fine di consentirne il rilascio rispetto al substrato 8 per attacco chimico di regioni di materiale sottostanti (in particolare costituite dal suddetto ossido sacrificale).

I vantaggi della presente soluzione emergono in maniera evidente dalla descrizione precedente.

In ogni caso, si evidenzia che la struttura di rilevamento 1 precedentemente descritta consente di ottenere: una elevata sensibilità all'accelerazione esterna

$a_{ext}$  ed una ridotta sensibilità ai disturbi; un ridotto ingombro nel piano orizzontale xy; una elevata gamma lineare (ad esempio fino a 50g) ed una elevata dinamica (limitata sostanzialmente dalla distanza tra la massa inerziale 2 ed il substrato 8).

Inoltre, la struttura di rilevamento 1 può essere realizzata con procedimenti di fabbricazione di tipo noto, senza richiedere sostanziali modifiche ai processi comunemente utilizzati.

Ad esempio, la presente Richiedente ha dimostrato mediante simulazioni la possibilità di ottenere una sensibilità di 280 Hz/g con dimensioni di 1120  $\mu\text{m}$  (lungo il primo asse orizzontale x), 608  $\mu\text{m}$  (lungo il secondo asse orizzontale y) e 30  $\mu\text{m}$  (lungo l'asse z); una dinamica fino a 17 g ed una non linearità minore di 2% (@50g).

Risulta infine chiaro che a quanto descritto ed illustrato possono essere apportate modifiche e varianti senza per questo uscire dall'ambito di tutela della presente invenzione, come definito nelle rivendicazioni allegate.

Ad esempio, si evidenzia che potrebbero essere previste differenti forme e dimensioni per la massa inerziale 2, purché essa conservi le caratteristiche di sbilanciamento ed eccentricità rispetto all'asse di rotazione A; ad esempio, tale massa inerziale 2 potrebbe avere una forma "a T" (ovvero, con la seconda porzione 2b con dimensione minore della prima

porzione 2a lungo il secondo asse orizzontale y).

Potrebbe inoltre essere presente un numero differente di elementi risonatori nella struttura di rilevamento 1, ad esempio uno solo (ad esempio, il primo elemento risonatore 10a), oppure più elementi per migliorarne ulteriormente la sensibilità. Ad esempio, due elementi risonatori potrebbero essere accoppiati a ciascun elemento elastico 6a, 6b, da parti opposte rispetto all'asse di rotazione A.

Inoltre, le porzioni di ancoraggio 21', 22' degli elettrodi di azionamento 21 e degli elettrodi di rilevamento 22 potrebbero essere avvicinate all'ancoraggio principale 4 della struttura di rilevamento 1, in modo da ridurre ulteriormente gli effetti dei disturbi, ad esempio di stress meccanici o termici.

## RIVENDICAZIONI

1. Struttura di rilevamento (1) per un accelerometro risonante ad asse verticale (32), comprendente:

- una massa inerziale (2), sospesa al di sopra di un substrato (8) ed avente un piano (xy) di estensione principale definito da un primo (x) e da un secondo (y) asse orizzontale ed una finestra (5) realizzata al suo interno e che la attraversa per un suo intero spessore, detta massa inerziale (2) essendo accoppiata ad un ancoraggio principale (4) disposto in detta finestra (5) e solidale a detto substrato (8) mediante un primo ed un secondo elemento elastico di ancoraggio (6a, 6b), di tipo torsionale e con estensione longitudinale da parti opposte di detto ancoraggio principale (4) definendo un asse di rotazione (A) di detta massa inerziale (2) parallelo a detto secondo asse orizzontale (y), detti primo e secondo elemento elastico (6a, 6b) essendo configurati in modo da consentire a detta massa inerziale (2) un movimento inerziale di rotazione intorno a detto asse di rotazione (A), in risposta ad un'accelerazione esterna ( $a_{ext}$ ) agente lungo un asse verticale (z) trasversale a detto piano (xy); ed

- almeno un primo elemento risonatore (10a), avente estensione longitudinale lungo detto primo asse orizzontale (x), accoppiato tra detto primo elemento elastico (6a) ed un primo elemento di vincolo (12a) disposto in detta finestra (5),  
in cui detto primo elemento di vincolo (12a) è sospeso

al di sopra di detto substrato (8) ed è accoppiato solidalmente a detto substrato (8) mediante un primo elemento ausiliario di ancoraggio (14a), che si estende al di sotto di detto primo elemento risonatore (10a) con estensione longitudinale lungo detto primo asse orizzontale (x) ed è accoppiato solidalmente tra detto primo elemento di vincolo (12a) e detto ancoraggio principale (4).

2. Struttura secondo la rivendicazione 1, in cui detto primo elemento risonatore (10a) è accoppiato a detto primo elemento elastico (6a) in modo tale che il movimento inerziale di rotazione di detta massa inerziale (2) intorno all'asse di rotazione (A) causa uno sforzo assiale, di compressione o di trazione, su detto primo elemento risonatore (10a) ed una conseguente variazione di una relativa frequenza di risonanza.

3. Struttura secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui detto primo elemento elastico (6a) presenta un primo spessore ( $w_1$ ) e detto primo elemento risonatore (10a) presenta un secondo spessore ( $w_2$ ) lungo detto asse verticale (z), detto secondo spessore ( $w_2$ ) essendo minore rispetto al primo spessore ( $w_1$ ); ed in cui detto primo elemento risonatore (10a) è accoppiato solidalmente a detto primo elemento elastico (6a) e a detto primo elemento di vincolo (12a) in corrispondenza di una loro rispettiva porzione superiore, posta a distanza lungo detto asse verticale (z) rispetto al sottostante substrato (8).

4. Struttura secondo la rivendicazione 3, in cui detto primo elemento ausiliario di ancoraggio (14a) è accoppiato a detto primo elemento di vincolo (12a) ed all'ancoraggio principale (4) in corrispondenza di una loro rispettiva porzione inferiore; ed in cui detto primo elemento ausiliario di ancoraggio (14a) è interposto in maniera flottante tra detto primo elemento risonatore (10a) e detto substrato (8), con un primo gap ( $g_1$ ) presente tra detto primo elemento ausiliario di ancoraggio (14a) e detto primo elemento risonatore (10a) ed un secondo gap ( $g_2$ ) presente tra detto primo elemento ausiliario di ancoraggio (14a) e detto substrato (8).

5. Struttura secondo la rivendicazione 3 o 4, in cui detto primo elemento ausiliario di ancoraggio (14a) presenta un terzo spessore ( $w_3$ ) lungo detto asse verticale (z); in cui detto primo spessore ( $w_1$ ) è pari alla somma di detti secondo ( $w_2$ ) e terzo ( $w_3$ ) spessore e di un primo gap ( $g_1$ ) presente tra detto primo elemento ausiliario di ancoraggio (14a) e detto primo elemento risonatore (10a).

6. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detto primo elemento risonatore (10a) è accoppiato a detto primo elemento elastico (6a) in prossimità di detto ancoraggio principale (4).

7. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre una coppia di elettrodi di

azionamento (21), disposti da parti opposte del primo elemento risonatore (10a) lungo detto secondo asse orizzontale (y) e configurati in modo da azionare detto primo elemento risonatore (10a) in un movimento di oscillazione di risonanza; e due coppie di elettrodi di rilevamento (22), disposti da parti opposte degli elettrodi di azionamento (21) lungo detto primo asse orizzontale (x) ed affacciati da parti opposte di detto primo elemento risonatore (10a) lungo detto secondo asse orizzontale (y), configurati in modo da rilevare, mediante una variazione dell'accoppiamento capacitivo con detto primo elemento risonatore (10a) una variazione della relativa frequenza di risonanza.

8. Struttura secondo la rivendicazione 7, in cui detti elettrodi di azionamento (21) e detti elettrodi di rilevamento (22) sono disposti al di sopra di detto primo elemento ausiliario di ancoraggio (14a) e presentano inoltre rispettive porzioni di ancoraggio (21', 22'), estendentisi fino a, e solidali a, detto substrato (8), disposte lateralmente nel piano orizzontale (xy) rispetto a detto primo elemento ausiliario di ancoraggio (14a); in cui dette rispettive porzioni di ancoraggio (21', 22') sono disposte centralmente rispetto all'estensione longitudinale del primo elemento risonatore (10a), in prossimità reciproca.

9. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre un secondo elemento risonatore

(10b), avente estensione longitudinale lungo detto primo asse orizzontale (x) ed accoppiato tra detto secondo elemento elastico (6b) ed un secondo elemento di vincolo (12b) disposto in detta finestra (5); in cui detto secondo elemento di vincolo (12b) è sospeso al di sopra di detto substrato (8) ed è accoppiato solidalmente a detto substrato (8) mediante un secondo elemento ausiliario di ancoraggio (14b) che si estende al di sotto di detto secondo elemento risonatore (10b) con estensione longitudinale lungo detto primo asse orizzontale (x) ed è accoppiato solidalmente tra detto secondo elemento di vincolo (12b) e detto ancoraggio principale (4).

10. Struttura secondo la rivendicazione 9, in cui detto primo elemento risonatore (10a) è disposto in una prima metà in cui detta finestra (5) è separata da detto asse di rotazione (A); e detto secondo elemento risonatore (10b) è disposto in una seconda metà di detta finestra (5), da parte opposta di detto primo elemento risonatore (10a) rispetto a detto asse di rotazione (A).

11. Struttura secondo la rivendicazione 9 o 10, in cui detti primo e secondo elemento risonatore (10a, 10b) e detti primo e secondo elemento ausiliario di ancoraggio (14a, 14b) sono disposti in maniera simmetrica rispetto ad un centro (O) di detto ancoraggio principale (4).

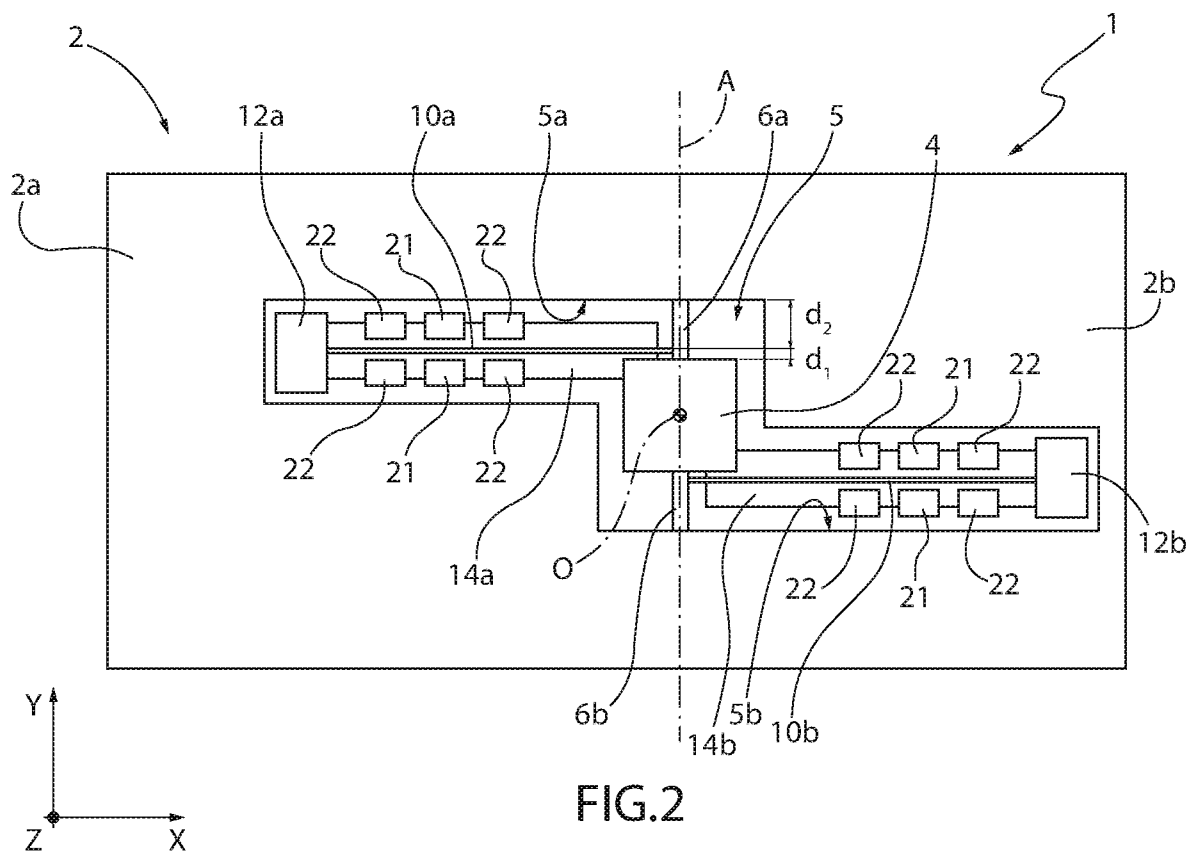
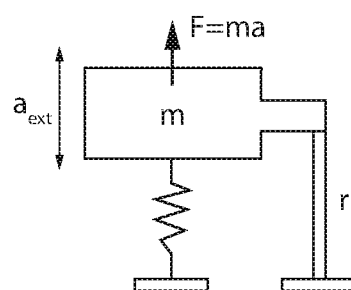
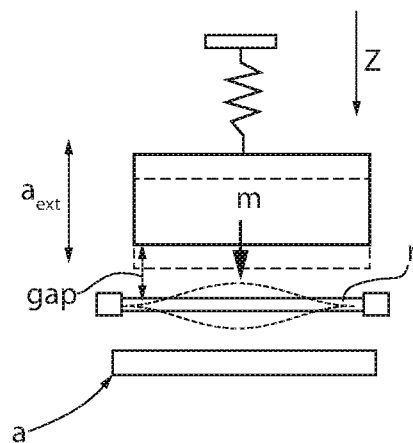
12. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni

precedenti, in cui detta massa inerziale (2) presenta una distribuzione di massa asimmetrica rispetto a detto asse di rotazione (A), in modo tale da essere vincolata in maniera eccentrica all'ancoraggio principale (4).

13. Accelerometro risonante (32), comprendente una struttura di rilevamento (1) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, e configurato in modo da rilevare una componente di accelerazione esterna lineare ( $a_{ext}$ ), diretta lungo detto asse verticale (z).

14. Accelerometro secondo la rivendicazione 13, comprendente inoltre un circuito di lettura e azionamento (30) accoppiato elettricamente a detta struttura di rilevamento (1).

15. Apparecchio elettronico (34), comprendente un accelerometro risonante (32) secondo la rivendicazione 13 o 14, ed un'unità di controllo (36), collegata elettricamente a detto circuito di lettura e azionamento (30).



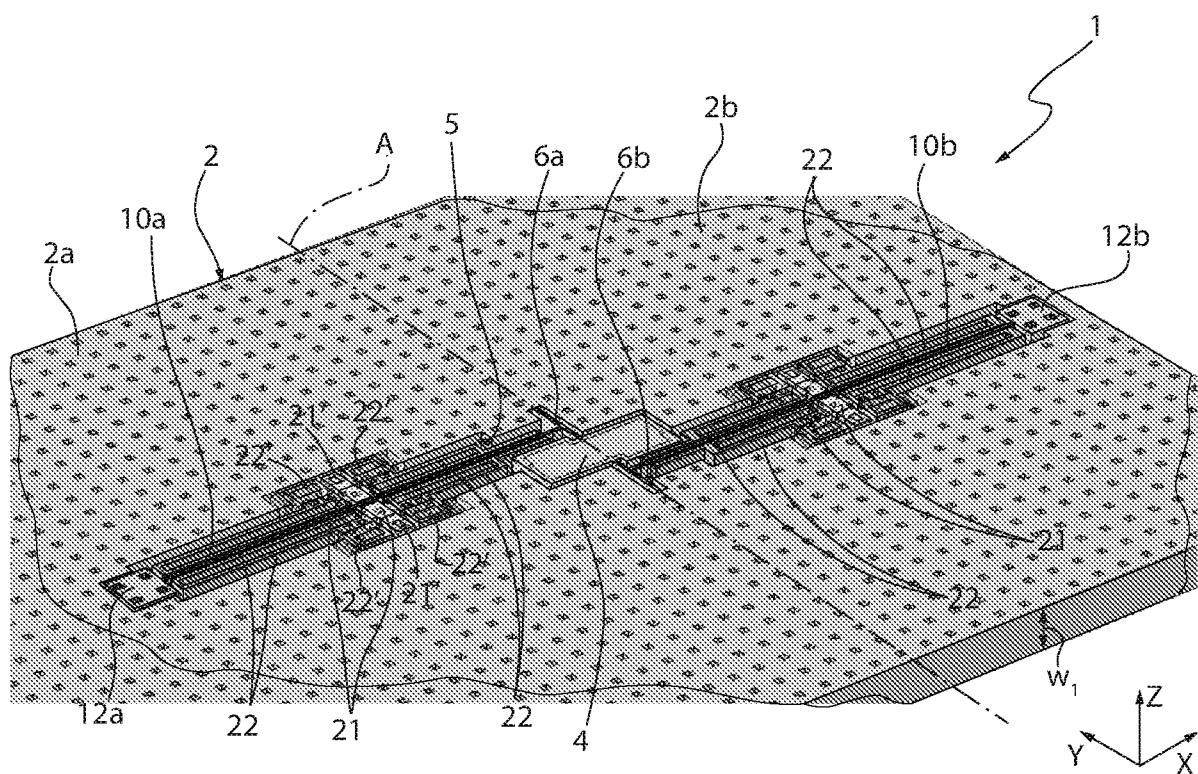


FIG. 3

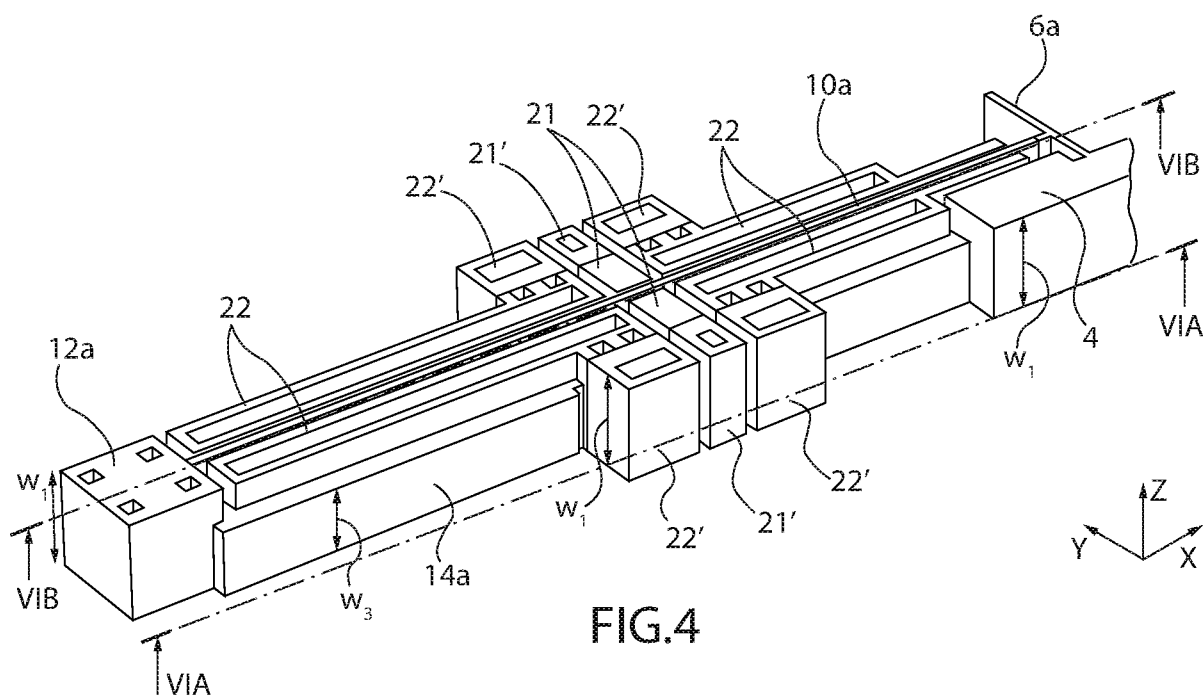
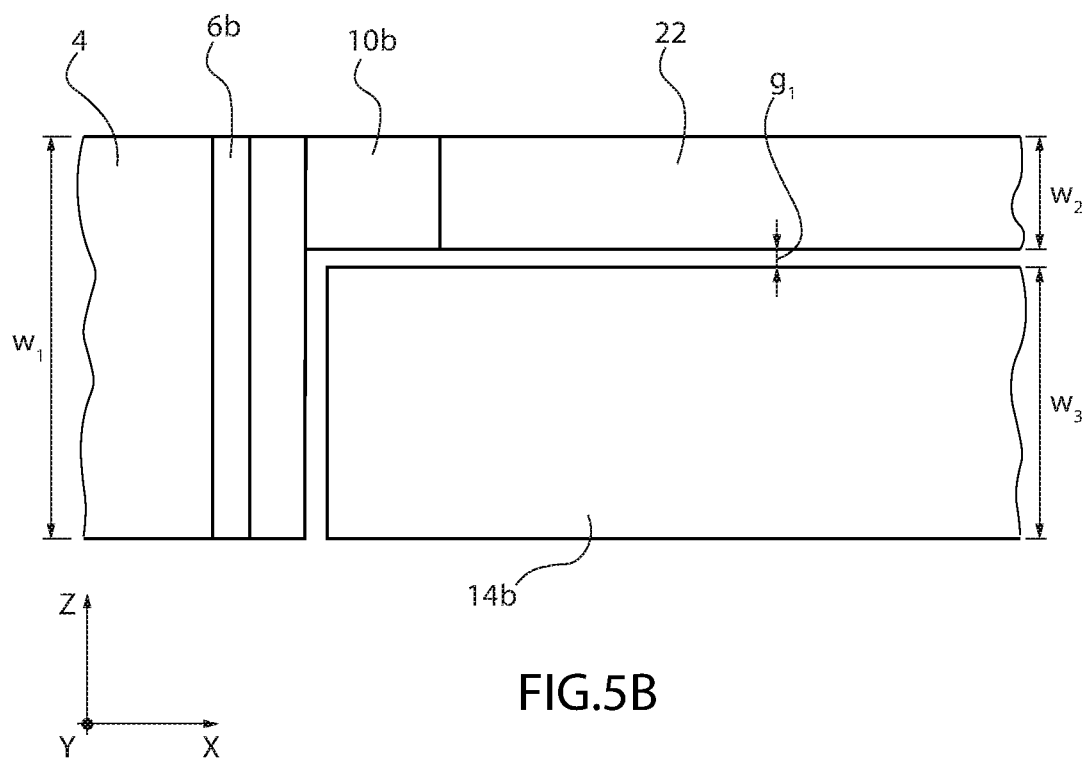
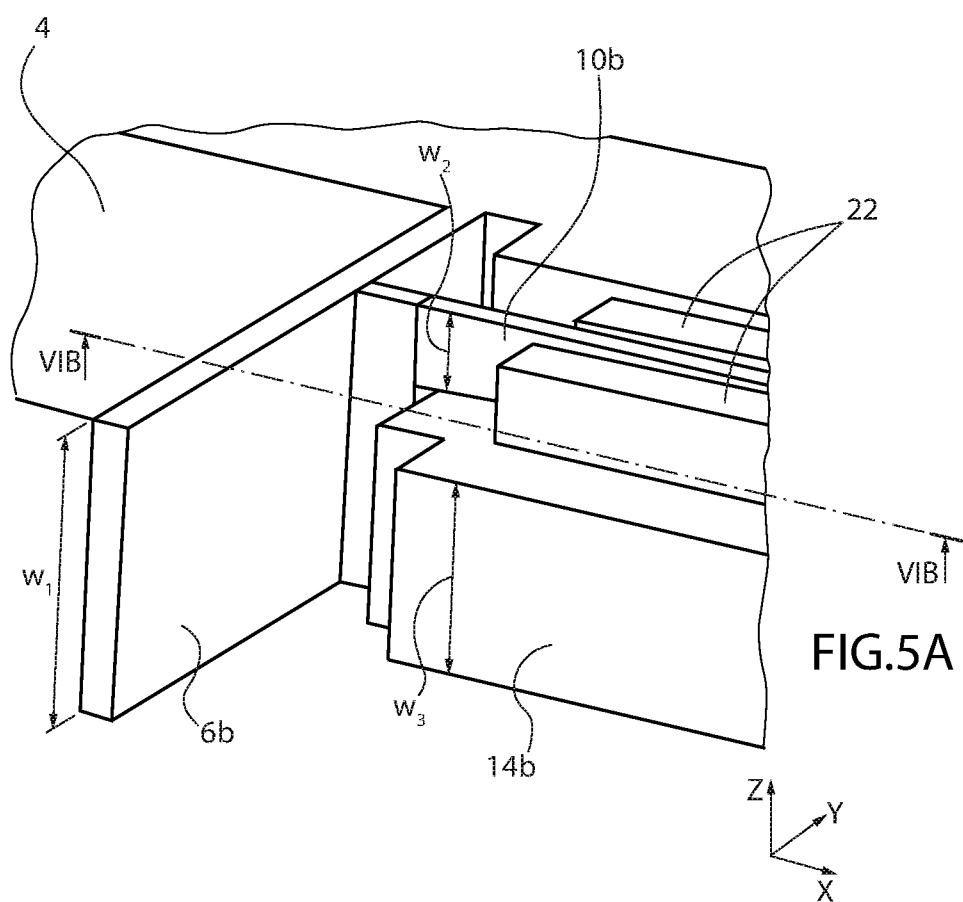
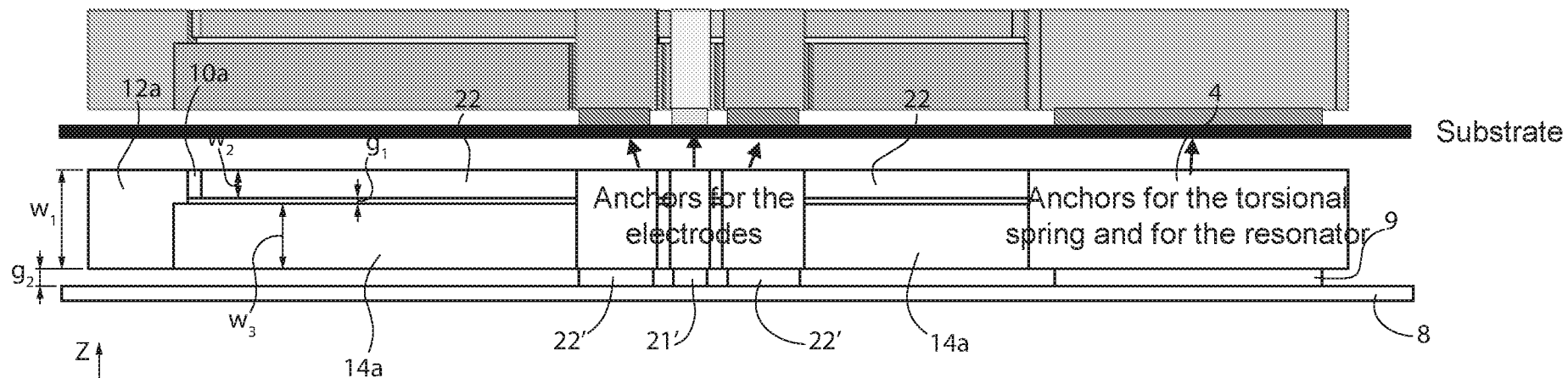


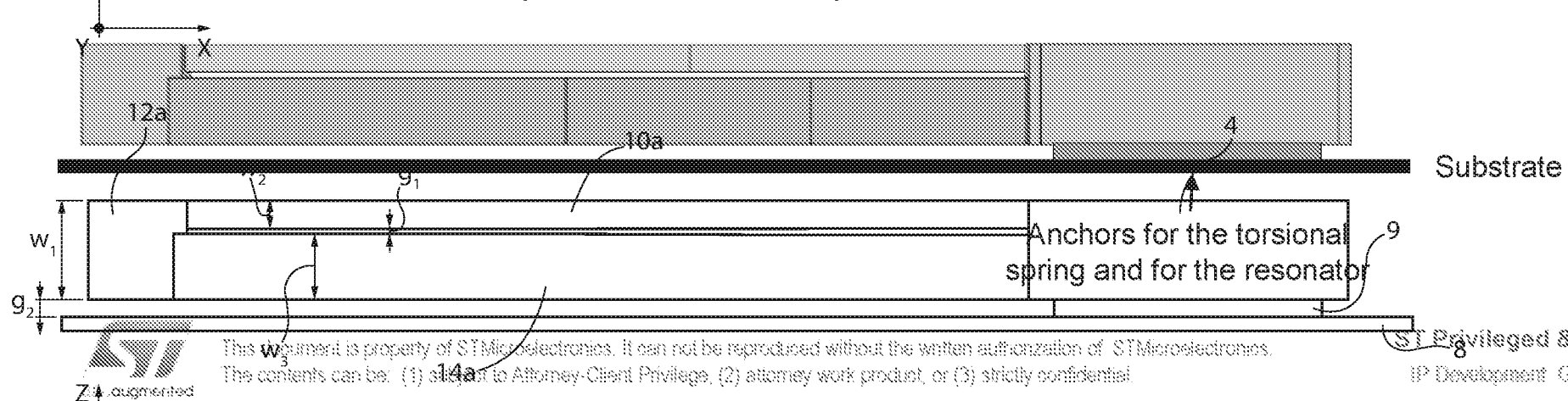
FIG. 4



Side view of the resonator (with electrodes in yellow and blue)



Side view of the resonator (without electrodes)



This document is property of STMicroelectronics. It can not be reproduced without the written authorization of STMicroelectronics.  
The contents can be: (1) subject to Attorney-Client Privilege, (2) attorney work product, or (3) strictly confidential

ST Privileged & Confidential  
IP Development Group

FIG.6B

