

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102010901893909A1

Publication Date

20120526

Applicant

POLITECNICO DI MILANO

Title

STRUTTURA DI ACCELEROMETRO BIASSIALE RISONANTE DI TIPO
MICROELETTROMECCANICO

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"STRUTTURA DI ACCELEROMETRO BIASSIALE RISONANTE DI TIPO MICROELETTROMECCANICO"

di 1) STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI, 2

AGRATE BRIANZA (MB)

2) POLITECNICO DI MILANO

di nazionalità italiana

con sede: PIAZZA LEONARDO DA VINCI, 32

MILANO (MI)

Inventori: COMI Claudia, CORIGLIANO Alberto, SIMONI Barbara

* * *

La presente invenzione si riferisce ad una struttura di accelerometro biassiale risonante di tipo microelettromeccanico (MEMS - Micro Electro Mechanical System), in particolare in grado di rilevare con elevate prestazioni elettriche due componenti indipendenti di accelerazione in un piano.

Come noto, gli accelerometri MEMS sono attualmente utilizzati, grazie alle loro dimensioni estremamente compatte, ridotti consumi e buone prestazioni elettriche, in svariati ambiti di applicazione, tra cui l'industria automobilistica, il monitoraggio delle vibrazioni e

l'elettronica portatile.

I numerosi accelerometri MEMS proposti in letteratura ed attualmente presenti sul mercato possono essere generalmente raggruppati in tre classi, sulla base del principio di rilevamento utilizzato dalla relativa struttura microelettromeccanica di rilevamento: capacitivo, risonante e piezoresistivo.

Negli accelerometri risonanti, l'accelerazione esterna da misurare produce uno spostamento rilevabile della frequenza di risonanza della struttura microelettromeccanica, o di una qualche parte della stessa. Il rilevamento risonante, rispetto ad altri principi di misura, ha il vantaggio di offrire una uscita di frequenza diretta, elevata sensibilità ed ampia gamma dinamica.

In maggiore dettaglio, l'accelerazione esterna è rilevata in termini di uno spostamento nella frequenza di risonanza di un elemento risonante, in genere conformato a trave (beam), accoppiato ad una massa inerziale (massa di prova, o massa libera, cosiddetta "proof mass").

Un'accelerazione esterna lineare a produce una forza F sulla massa inerziale m , con $F = m \cdot a$; tale forza produce a sua volta un'azione assiale N , ad essa proporzionale (e dunque proporzionale alla stessa accelerazione esterna a) nell'elemento risonante, che è opportunamente mantenuto in condizione di risonanza da un'elettronica ad esso

accoppiata. L'azione assiale determina quindi una variazione della frequenza propria di risonanza, indicata con f , dell'elemento risonante, secondo la relazione seguente:

$$f = f_0 \cdot \sqrt{1 + \alpha \frac{NL^2}{EI}} \quad (1)$$

in cui f_0 denota la frequenza fondamentale dell'elemento risonante privo di carico assiale, data da:

$$f_0 = \frac{c^2}{2\pi L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2)$$

ed inoltre L , A ed I sono rispettivamente la lunghezza, l'area della sezione trasversale ed il momento d'inerzia dell'elemento risonante, ρ è la densità di massa del materiale di cui è costituito, E è il modulo elastico e c ed α sono coefficienti il cui valore è dipendente, in modo noto, dalle condizioni di vincolo della trave che realizza lo stesso elemento risonante.

Se l'accelerazione esterna è angolare, anziché lineare, si genera una coppia proporzionale al momento polare J della massa, che induce, analogamente a quanto discusso in precedenza, un'azione assiale sull'elemento risonante, variandone la frequenza secondo la suddetta relazione (1).

Diversi accelerometri basati sul principio operativo risonante sono stati proposti e realizzati attraverso le tecnologie dei semiconduttori, ed in particolare mediante

tecniche di "microlavorazione di volume" (bulk micromachining) o, più recentemente, di "microlavorazione superficiale" (surface micromachining). Con riferimento ad accelerometri risonanti realizzati con le tecniche di microlavorazione superficiale, si possono ad esempio citare i seguenti documenti:

M. Aikele, K. Bauer, W. Ficker, F. Neubauer, U. Prechtel, J. Schalk, H. Seidel "Resonant accelerometer with self-test", Sensors and Actuators A, 92, 161-167, 2001;

A.A. Seshia, M. Palaniapan, T.A. Roessig, R.T. Howe, R.W. Gooch, T.R. Shimert, S. Montague "A vacuum packaged surface micromachined resonant accelerometer", JMEMS, 11,784-793, 2002;

L. He; Y.-P. Xu; A. Qiu "Folded silicon resonant accelerometer with temperature compensation", Sensors 2004. Proceedings of IEEE, 1, 512-515, 24-27 Ottobre 2004;

S.X.P. Su, H.S. Yang, A.M. Agogino "A resonant accelerometer with two-stage microleverage mechanisms fabricated by SOI-MEMS technology" Sensors, 5(6), 1214-1223, 2005.

I vari accelerometri MEMS risonanti, ad oggi proposti, si differenziano dal punto di vista delle geometrie realizzate per la struttura microelettromeccanica di rilevamento (in particolare per le diverse disposizioni dell'elemento risonante rispetto alla massa inerziale), e

Elena CERBARO

(Iscrizione Albo nr. 426/BM)

conseguentemente per le caratteristiche elettriche che ne derivano, ad esempio per quanto riguarda l'amplificazione della forza assiale e pertanto la sensibilità nel rilevamento di accelerazione. In particolare, la sensibilità degli accelerometri risonanti è generalmente definita come la variazione di frequenza generata da una accelerazione esterna pari a 1 g.

Accelerometri risonanti noti ottenuti attraverso tecniche di microlavorazione superficiale tipicamente hanno una sensibilità che parte da qualche decina di Hz/g e non supera i 200 Hz/g, e, almeno alcuni tra essi, presentano dimensioni piuttosto elevate.

Inoltre, gli accelerometri MEMS risonanti proposti ad oggi sono per lo più di tipo monoassiale, ovvero in grado di rilevare, con un'unica massa inerziale di rilevamento, un'unica componente di accelerazione diretta lungo un dato asse di rilevamento. Di conseguenza, risulta necessario replicare le strutture microelettromeccaniche proposte, ciascuna dotata di una relativa massa inerziale, per ottenere un rilevamento di componenti di accelerazione dirette lungo più assi di rilevamento.

La presente richiedente ha recentemente proposto nella domanda di brevetto TO2009A000687, depositata il 7 settembre 2009 e non ancora pubblicata, una struttura microelettromeccanica per un accelerometro risonante, di

tipo uniassiale, che presenta un'elevata sensibilità e dimensioni ridotte, grazie alla particolare disposizione geometrica degli elementi costitutivi. Anche gli insegnamenti di tale domanda di brevetto non riguardano tuttavia una struttura a più assi di rilevamento, che risulti compatta ed avere elevate prestazioni elettriche.

Lo scopo della presente invenzione è pertanto quello di fornire una struttura microelettromeccanica per un accelerometro risonante, avente migliorate caratteristiche fisiche ed elettriche, ed in particolare che consenta un rilevamento biassiale di componenti di accelerazioni agenti lungo almeno due assi di rilevamento in un piano.

Secondo la presente invenzione, viene pertanto fornita una struttura microelettromeccanica per un accelerometro risonante, come definita nelle rivendicazioni allegate.

Per una migliore comprensione della presente invenzione, ne sono ora descritte forme di realizzazione preferite, puramente a titolo di esempio non limitativo e con riferimento ai disegni allegati, in cui:

- la figura 1 mostra una vista in pianta schematica di un struttura microelettromeccanica di rilevamento di un accelerometro risonante, secondo una prima forma di realizzazione della presente invenzione;

- le figure 2a, 2b e 2c mostrano deformazioni della struttura microelettromeccanica di rilevamento di figura 1,

Elena CERBARO

(Iscrizione Albo nr. 426/BM)

in presenza di differenti sollecitazioni esterne;

- la figura 3 è uno schema a blocchi semplificato di un accelerometro risonante incorporante la struttura di rilevamento microelettromeccanica di rilevamento, e di un apparecchio elettronico provvisto di tale accelerometro risonante;

- la figura 4 mostra una vista in pianta schematica di un struttura microelettromeccanica di rilevamento, in accordo con una seconda forma di realizzazione della presente invenzione;

- le figure 5 e 6 sono immagini SEM (Scanning Electron Microscopy) della struttura microelettromeccanica di rilevamento, rispettivamente di figura 1 e 4; e

- le figure 7a e 7b mostrano viste in pianta semplificate di ulteriori varianti della struttura microelettromeccanica di rilevamento.

Come sarà chiarito in seguito, un aspetto della presente invenzione prevede l'impiego di un'unica massa inerziale per il rilevamento di almeno due componenti di accelerazione indipendenti in un piano, in particolare coincidente con un piano di estensione principale della stessa massa inerziale; a tale unica massa inerziale vengono accoppiati in modo opportuno elementi risonanti, per il rilevamento delle suddette componenti di accelerazione secondo il principio della variazione della

frequenza di risonanza (si veda a riguardo la discussione precedente).

In dettaglio, la figura 1 mostra una prima forma di realizzazione di una struttura microelettromeccanica di rilevamento, indicata nel suo complesso con 1, di un accelerometro biassiale risonante. La struttura microelettromeccanica 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).

La struttura microelettromeccanica di rilevamento 1 comprende un'unica massa inerziale 2, che presenta ad esempio una forma genericamente quadrata in un piano xy , corrispondente ad un suo piano principale di estensione, definito da un primo e da un secondo asse x , y , che corrispondono inoltre alle direzioni di rilevamento dell'accelerometro biassiale risonante (come sarà chiarito in seguito); la massa inerziale 2 presenta una dimensione trascurabile in direzione ortogonale allo stesso piano xy , lungo un terzo asse z definente una terna di assi ortogonali con i suddetti primo e secondo asse x , y .

In particolare, la massa inerziale 2 presenta, in tale prima forma di realizzazione, quattro porzioni di massa $2a-2d$, ad esempio aventi una forma sostanzialmente quadrata nel piano xy , che ne definiscono un contorno esterno nello

stesso piano xy , ed una porzione centrale $2e$, che raccorda centralmente le porzioni di massa $2a-2d$ e presenta anch'essa ad esempio una forma sostanzialmente quadrata in pianta. La massa inerziale 2 presenta inoltre un asse baricentrico (definito come l'asse passante per il suo centro di gravità G , in questo caso coincidente con il centro geometrico della porzione centrale $2e$), che rappresenta inoltre un asse di simmetria per la struttura microelettromeccanica di rilevamento 1 ed è diretto ortogonalmente al piano xy .

Le porzioni di massa $2a-2d$ definiscono, a coppie adiacenti, rispettive finestre 4 , in numero totale pari a quattro, che si estendono a partire dalla porzione centrale $2e$ e si aprono verso l'esterno della massa inerziale 2 ; in particolare, finestre 4 di una prima coppia si estendono da parti opposte della porzione centrale $2e$ lungo il secondo asse y , mentre le restanti finestre 4 si estendono lungo il primo asse x , anch'esse da parti opposte della porzione centrale $2e$. In generale, la struttura della massa inerziale 2 risulta simmetrica rispetto ad assi paralleli agli assi x ed y e passanti per il centro geometrico della porzione centrale $2e$ (centro di gravità G).

La massa inerziale 2 è ancorata ad un substrato (non illustrato, ad esempio un substrato di materiale semiconduttore, quale il silicio), in modo da essere

sospesa al di sopra dello stesso substrato, con il piano xy sostanzialmente parallelo ad una superficie superiore dello stesso substrato.

In particolare, la massa inerziale 2 è accoppiata elasticamente a primi ancoraggi 6, in numero totale pari a quattro nella prima forma di realizzazione illustrata, disposti esternamente alla stessa massa inerziale 2, allineati a coppie alle finestre 4 nella direzione del prolungamento delle stesse finestre 4, lungo il primo o il secondo asse x , y ; i primi ancoraggi 6 sono ad esempio costituiti da pilastri che si estendono fino a, e sono connessi meccanicamente al, substrato.

In particolare, la massa inerziale 2 è collegata ai suddetti primi ancoraggi 6 mediante rispettivi elementi elastici 8 (anch'essi in numero pari a quattro nella forma di realizzazione illustrata), nel complesso configurati in modo da mantenere la massa inerziale 2 sospesa al di sopra del substrato e da consentirne almeno un primo ed un secondo movimento lineare di traslazione (rispetto allo stesso substrato), rispettivamente lungo il primo ed il secondo asse x , y , e da impedirne i movimenti al di fuori dello stesso piano xy .

Ciascun elemento elastico 8 comprende: una prima porzione 8a, costituita da una molla lineare rettilinea (cosiddetto "singolo beam"), estendentesi lungo il primo, o

secondo, asse x , y a partire da una superficie laterale esterna della porzione centrale 2e della massa inerziale 2 (centralmente rispetto ad essa), all'interno di una rispettiva finestra 4; una seconda porzione 8b, connessa alla prima porzione 8a, e costituita da una molla ripiegata (cosiddetto "folded beam") avente estensione in direzione trasversale alla prima porzione 8a, in particolare lungo il secondo o primo asse y , x (la seconda porzione 8b è dunque costituita da una pluralità di molle rettilinee, parallele tra loro, aventi estensione principale lungo la suddetta direzione trasversale, e raccordate tra loro in corrispondenza delle relative estremità); ed una terza porzione 8c, connessa alla seconda porzione 8b, e costituita nuovamente da una molla rettilinea, avente estensione lungo il primo o secondo asse x , y , a prolungamento della prima porzione 8a, con lunghezza molto minore rispetto alla corrispondente lunghezza della stessa prima porzione 8a, fino a raggiungere un rispettivo primo ancoraggio 6, congiungendosi ad una sua superficie laterale esterna affacciata alla corrispondente superficie laterale della porzione centrale 2e.

In particolare, gli elementi elastici 8 sono molto sottili (le relative porzioni costituenti hanno cioè una lunghezza nella direzione di estensione molto maggiore della relativa larghezza).

La struttura microelettromeccanica di rilevamento 1 comprende inoltre una parte risonante, formata da quattro elementi risonanti 10a-10d, ciascuno dei quali è costituito da una sottile trave risonante.

Nella forma di realizzazione illustrata, gli elementi risonanti 10a-10d sono disposti esternamente alla massa inerziale 2, rispetto al piano xy, e si estendono, paralleli a coppie, lungo il primo o il secondo asse x, y, parallelamente inoltre alla seconda porzione 8b di un associato elemento elastico 8, esternamente ad essa.

In particolare, ciascun elemento risonante 10a-10d è vincolato rigidamente al substrato in corrispondenza di una sua prima estremità, mediante un rispettivo secondo ancoraggio 12 (nuovamente costituito ad esempio da un pilastro che si estende fino a, ed è connesso al, substrato); e si estende a partire dallo stesso secondo ancoraggio 12 fino ad unirsi, con una sua seconda estremità, ad un rispettivo elemento elastico 8, in particolare alla terza porzione 8c dello stesso elemento elastico 8, in stretta prossimità del rispettivo primo ancoraggio 6 dello stesso elemento elastico 8. Il punto di connessione dell'elemento risonante 10a-10d al rispettivo elemento elastico 8 è denotato con c. Ciascun elemento risonante 10a-10d forma dunque con la parte della terza porzione 8c del rispettivo elemento elastico 8, compresa

tra il punto di connessione c ed il relativo primo ancoraggio 6, una struttura risonante "sagomata ad L".

Ciascun elemento risonante 10a-10d è dunque accoppiato meccanicamente alla massa inerziale 2 per il tramite di un rispettivo elemento elastico 8. Vantaggiosamente, tale configurazione consente di ottenere elevati valori di sensibilità di rilevamento con una massa inerziale 2 di dimensioni contenute, in quanto la presenza intermedia degli elementi elastici 8 evita che la rigidità degli elementi risonanti 10a-10d ostacoli direttamente la massa inerziale 2 e dunque ne riduca l'escursione dei movimenti al rilevamento delle accelerazioni esterne.

Si è verificato inoltre che la posizione del punto di connessione c in stretta prossimità dei primi ancoraggi 6 è un fattore che determina le caratteristiche elettriche della struttura di rilevamento risonante (in termini di amplificazione della forza assiale in risposta ad un'accelerazione esterna, e dunque della sensibilità di rilevamento). In particolare, è stato verificato, mediante simulazioni e prove sperimentali, che risulta vantaggioso, per migliorare la sensibilità di rilevamento (definita come la variazione di frequenza prodotta da un'accelerazione pari ad $1g$, g essendo l'accelerazione di gravità), posizionare il punto di connessione c molto vicino alla posizione dei primi ancoraggi 6 degli elementi elastici 8.

Ad esempio, definendo L la lunghezza degli stessi elementi elastici 8, considerati nel loro insieme, lungo il primo o secondo asse x , y (dalla porzione centrale 2e della massa inerziale 2 fino al rispettivo primo ancoraggio 6), risulta vantaggioso posizionare il punto di connessione c ad una distanza dal relativo primo ancoraggio 6 compresa tra $0,01 \cdot L$ e $0,02 \cdot L$, ad esempio a circa un sessantesimo della lunghezza L partendo dal relativo primo ancoraggio 6.

La configurazione descritta degli elementi risonanti 10a-10d permette inoltre vantaggiosamente di incrementare l'intervallo di comportamento lineare in frequenza della struttura microelettromeccanica di rilevamento 1. In particolare, si può dimostrare che la presenza della parte della terza porzione 8c degli elementi elastici 8, compresa tra il punto di connessione c ed il relativo primo ancoraggio 6, di dimensioni ridotte, fa sì che il comportamento lineare di ciascun elemento risonante 10a-10d non si discosti sostanzialmente da quello di risonatori standard vincolati in corrispondenza di entrambi gli estremi (cosiddetti risonatori "double-clamped"), mentre al contrario risulti notevolmente migliorato il comportamento non lineare. Ad esempio, il cosiddetto effetto "hard spring" esibito dai risonatori "double-clamped", in presenza di oscillazioni di ampiezza confrontabile con la larghezza degli stessi risonatori, risulta notevolmente

attenuato nella struttura proposta, grazie alle mutate condizioni al contorno ("boundary conditions") definite dall'accoppiamento di una delle estremità degli elementi risonanti 10a-10d al rispettivo elemento elastico 8.

La struttura microelettromeccanica di rilevamento 1 comprende inoltre, per ciascun elemento risonante 10a-10d, una coppia di elettrodi 13, 14, disposti parallelamente tra loro e parallelamente al relativo elemento risonante 10a-10d, da parti opposte dello stesso elemento risonante 10a-10d rispetto al primo o secondo asse x , y . Un primo elettrodo 13 è utilizzato per azionare l'associato elemento risonante 10a-10d in condizione di risonanza, mediante l'applicazione di un'opportuna differenza di potenziale elettrico; mentre un secondo elettrodo 14 è utilizzato come elettrodo di rilevamento, per rilevare, mediante una variazione dell'accoppiamento capacitivo con l'elemento risonante 10a-10d, variazioni della relativa frequenza di risonanza (secondo uno schema di rilevamento noto come "parallel plate"). Come mostrato nella figura 1, gli elettrodi 13 e 14 presentano un ingombro lungo la relativa direzione di estensione che risulta vantaggiosamente contenuto tra un secondo ancoraggio 12 e la terza porzione 8c dell'affacciato elemento elastico 8. In maniera non illustrata, opportune piste di collegamento elettrico sono previste per il collegamento elettrico dei suddetti

elettrodi 13, 14 ad un circuito elettronico accoppiato alla struttura microelettromeccanica di rilevamento 1; tale circuito elettronico è configurato in modo da fornire i segnali elettrici di azionamento alla struttura microelettromeccanica di rilevamento 1, e ricevere ed elaborare i segnali elettrici di rilevamento forniti dalla stessa struttura microelettromeccanica di rilevamento 1.

In modo qui non illustrato, possono essere inoltre previsti opportuni elementi di arresto (stopper) per limitare l'escursione del movimento della massa inerziale 2 nel piano xy ; tali stopper sono convenientemente ancorati al substrato, ed in grado di arrestare il movimento della massa inerziale 2. In ogni caso, è stato verificato che gli sforzi a cui sono sottoposti gli elementi elastici 8, in particolare in corrispondenza dei relativi primi ancoraggi 6, possono rientrare ampiamente nei limiti di resistenza del materiale di cui sono costituiti (ad esempio polisilicio).

Viene ora descritto il principio di funzionamento della struttura microelettromeccanica di rilevamento 1, facendo riferimento anche alle figure 2a-2c, che ne illustrano possibili deformazioni in risposta a differenti sollecitazioni esterne, ed in particolare in risposta ad: una prima accelerazione lineare agente lungo il primo asse x (figura 2a); una seconda accelerazione lineare agente

lungo il secondo asse y (figura 2b); ed una terza accelerazione, angolare, agente intorno all'asse baricentrico, o , in modo equivalente, intorno al terzo asse z . Come sarà evidenziato in dettaglio, la disposizione degli elementi elastici 8 consente infatti tre movimenti della massa inerziale 2 nel piano xy (una prima ed una seconda traslazione rispettivamente lungo il primo ed il secondo asse x , y , ed inoltre una rotazione attorno al terzo asse z); gli effetti di tali movimenti sugli elementi risonanti 10a-10d sono disaccoppiabili, in modo tale da consentire di rilevare singolarmente e senza reciproche interferenze le relative componenti di accelerazione.

In assenza di accelerazione esterna, i quattro elementi risonanti 10a-10d presentano la stessa frequenza nominale di risonanza f_0 , per effetto dell'interazione con i relativi primi elettrodi 13 e l'associato circuito elettronico.

Quando la massa inerziale 2 è sottoposta ad una prima accelerazione a_x lungo il primo asse x (nel verso della freccia in figura 2a), la massa inerziale 2 trasla complessivamente lungo lo stesso primo asse x , per effetto della flessione della seconda porzione 8b (ripiegata) di una prima coppia degli elementi elastici 8, ed inoltre della flessione della prima porzione 8a (lineare) dei restanti elementi elastici 8 (in generale, si verifica la

flessione delle molle con estensione trasversale alla direzione di spostamento, in questo caso con estensione lungo il secondo asse y , mentre le molle con estensione lungo il primo asse x non subiscono una apprezzabile deformazione assiale). Si noti che in figura 2a (così come nelle successive figure 2b e 2c) la posizione di partenza della massa inerziale 2 viene indicata in linea tratteggiata, mentre la posizione risultante dallo spostamento dovuto all'accelerazione esterna viene indicata in linea continua.

Il movimento di traslazione della massa inerziale 2 lungo il primo asse x causa pertanto, in maniera evidente, uno sforzo di compressione $-N_1$ su un primo elemento risonante 10a della coppia di elementi risonanti disposti lungo il primo asse x , ed uno sforzo di trazione N_1 , della stessa intensità, sul secondo elemento risonante 10c della stessa coppia; in particolare, il movimento della massa inerziale 2 è trasmesso agli elementi risonanti 10a, 10c dai rispettivi elementi elastici 8, in corrispondenza del punto di connessione c , la cui posizione risulta sostanzialmente vincolata.

Di conseguenza, la frequenza di risonanza del primo elemento risonante 10a, indicata con f_1 , subisce un decremento del suo valore, mentre la frequenza di risonanza del secondo elemento risonante 10c della coppia, indicata

con f_2 , subisce un corrispondente incremento del suo valore. Combinando opportunamente i segnali elettrici in uscita dai due elementi risonanti 10a, 10c, ed utilizzando l'equazione (1) discussa precedentemente, linearizzata intorno alla frequenza fondamentale f_0 , risulta possibile ottenere la seguente espressione per la differenza tra la seconda e la prima frequenza f_2, f_1 :

$$f_2 - f_1 \cong f_0 \left(1 + \alpha \frac{N_1 L^2}{2EI} - 1 + \alpha \frac{N_1 L^2}{2EI} \right) = f_0 \alpha \frac{N_1 L^2}{EI} \quad (3)$$

Tale differenza risulta dunque direttamente proporzionale allo sforzo di compressione/trazione N_1 agente sugli elementi risonanti 10a, 10c, e dunque al valore della prima accelerazione a_x agente lungo il primo asse x (che può essere dunque convenientemente misurato).

Si sottolinea che la presenza dei due elementi risonanti, in questo caso gli elementi risonanti 10a, 10c, che sono sottoposti a forze assiali opposte fornisce diversi vantaggi, tra cui:

- la sensibilità nel rilevamento delle accelerazioni esterne risulta raddoppiata misurando la differenza tra la frequenza dei due elementi risonanti, anziché la variazione di frequenza di un singolo elemento risonante;

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

- la geometria descritta è meno sensibile agli effetti spuri del carico termico, dato che, quando si considera la differenza tra le frequenze, viene cancellato un effetto non elastico che provoca una pre-sollecitazione negli elementi risonanti.

Vantaggiosamente, gli elementi risonanti 10b, 10d dell'altra coppia di elementi risonanti disposti lungo il secondo asse y risultano invece sostanzialmente scarichi e non soggetti a sforzi assiali rispetto alla condizione di riposo, in presenza della stessa prima accelerazione esterna a_x .

In maniera del tutto analoga, e come illustrato in figura 2b, una seconda accelerazione a_y agente lungo il secondo asse y determina uno spostamento complessivo della massa inerziale 2 lungo il secondo asse y (nel verso indicato dalla freccia nella stessa figura 2b).

Il movimento di traslazione della massa inerziale 2 lungo il secondo asse y causa in tal caso uno sforzo di compressione $-N_2$ (con N_2 che può essere uguale ad N_1 , nel caso di una struttura perfettamente simmetrica) su un primo elemento risonante 10d della coppia di elementi risonanti disposti lungo il secondo asse y , ed uno sforzo di trazione N_2 , della stessa intensità, sul secondo elemento risonante 10b della coppia. In maniera del tutto analoga a quanto discusso precedentemente, la differenza tra le frequenze di

risonanza (f_4-f_3) di tali elementi risonanti 10d, 10b risulta dunque proporzionale al valore della seconda accelerazione esterna a_y agente lungo il secondo asse y , che può convenientemente essere misurato dal circuito elettronico accoppiato alla struttura microelettromeccanica di rilevamento 1.

Anche in questo caso, gli elementi risonanti 10a, 10c dell'altra coppia di elementi risonanti disposti lungo il primo asse x risultano invece sostanzialmente scarichi e non soggetti a sforzi rispetto alla condizione di riposo, in presenza della seconda accelerazione esterna a_y .

La struttura microelettromeccanica di rilevamento 1 risulta inoltre sensibile ad una terza accelerazione esterna a_θ , angolare, agente intorno al terzo asse z , come illustrato in figura 2c.

In questo caso, la massa inerziale 2 viene posta in rotazione intorno al suo asse baricentrico, provocando sforzi assiali dello stesso valore e segno, N_θ , in tutti e quattro gli elementi risonanti 10a-10d. In tal caso, sommando in modo opportuno i valori di frequenza di risonanza f_1-f_4 degli elementi risonanti 10a-10d, si ottiene una misura dello sforzo agente sugli stessi elementi risonanti 10a-10d, e dunque della terza accelerazione esterna a_θ :

$$f_1 + f_2 + f_3 + f_4 - 4 \cdot f_0 \cong 4 \cdot f_0 \left(1 + \alpha \frac{N_\theta L^2}{2EI} - 1 \right) = 2 \cdot f_0 \cdot \alpha \frac{N_\theta L^2}{EI} \quad (4)$$

Risulta dunque evidente che la struttura microelettromeccanica di rilevamento 1 è configurata in modo tale da disaccoppiare gli effetti delle accelerazioni esterne sugli elementi risonanti 10a-10d, ed in particolare in modo tale che risulti possibile, mediante opportune combinazioni delle grandezze elettriche fornite dai vari elementi risonanti 10a-10d, determinare indipendentemente il valore delle stesse accelerazioni esterne.

A tal fine, come mostrato in figura 3, la struttura microelettromeccanica di rilevamento 1 è convenientemente accoppiata ad un opportuno circuito elettronico di lettura 15, configurato in modo tale da effettuare le suddette elaborazioni e combinazioni dei valori di frequenza f_1 - f_4 , per determinare i valori delle accelerazioni esterne lineari, a_x e a_y , ed angolare a_θ . Convenientemente, il circuito elettronico di lettura 15 comprende tre canali di misura disaccoppiati tra loro, per la misura rispettivamente della prima e seconda accelerazione esterna lineare, a_x e a_y , e della accelerazione esterna angolare a_θ). La struttura microelettromeccanica di rilevamento 1 e l'associato circuito elettronico di lettura 15 formano insieme un accelerometro biassiale risonante 16 (in grado inoltre di rilevare una accelerazione angolare, come

precedentemente illustrato); il circuito elettronico di lettura 15 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 in cui è realizzata la struttura microelettromeccanica di rilevamento 1.

Come mostrato schematicamente nella stessa figura 3, un apparecchio elettronico 18, provvisto di tale accelerometro biassiale risonante 16, ad esempio un apparecchio portatile, quale un laptop, un palmare o una foto- o video-camera, comprende inoltre un'unità di controllo 19 (ad esempio a microprocessore), collegata elettricamente al circuito elettronico di lettura 15, in modo da ricevere le misure di accelerazione per eseguire operazioni di controllo per la gestione dello stesso apparecchio elettronico 18.

Viene ora descritta con riferimento alla figura 4 una seconda forma di realizzazione della struttura microelettromeccanica di rilevamento, qui indicata con 1', che differisce da quanto illustrato in precedenza per una diversa configurazione dei suoi elementi costitutivi. Il funzionamento della struttura microelettromeccanica di rilevamento 1' non differisce invece da quanto illustrato in precedenza, e, per tale motivo, non verrà nel seguito

nuovamente discusso.

In particolare, tale seconda forma di realizzazione si contraddistingue per il fatto che gli elementi risonanti 10a-10d sono disposti internamente rispetto all'ingombro della massa inerziale, qui indicata con 2', nel piano xy.

In dettaglio, la massa inerziale 2' comprende in tal caso una cornice 20, ad esempio di perimetro sostanzialmente quadrato nel piano xy, e definente internamente un'apertura interna 22. La massa inerziale 2' comprende anche in questo caso quattro porzioni di massa, qui indicate con 2a'-2d', disposte internamente alla cornice 20 nell'apertura interna 22, e collegate a rispettivi angoli interni della stessa cornice 20. Le porzioni di massa 2a'-2d' presentano ad esempio forma sostanzialmente rettangolare nel piano xy, sono disposte parallele a coppie e simmetricamente rispetto al centro di gravità G.

La massa inerziale 2' è qui fissata al substrato (nuovamente non illustrato) mediante un singolo primo ancoraggio 6, disposto centralmente nell'apertura interna 22, ed attraversato centralmente dall'asse baricentrico (in corrispondenza del centro di gravità G).

Gli elementi elastici 8, in numero pari a quattro, si estendono dunque anch'essi nell'apertura interna 22, all'interno della cornice 20, a partire da rispettive

superfici laterali esterne del primo ancoraggio 6 fino ad una affacciata superficie laterale interna della stessa cornice 20. La seconda porzione 8b di ciascun elemento elastico 8 si trova in particolare disposta tra la superficie laterale interna della stessa cornice 20 ed una superficie laterale di rispettive porzioni di massa 2a'-2d' della massa inerziale 2', ad essa affacciate. In questo caso, la prima porzione 8a di ciascun elemento elastico 8 presenta lunghezza molto minore della terza porzione 8c, data la posizione centrale del singolo primo ancoraggio 6 e la disposizione della seconda porzione 8b degli stessi elementi elastici 8.

Inoltre, gli elementi risonanti 10a-10d si trovano disposti nell'apertura interna 22, internamente alla cornice 20, affacciati ai rispettivi elettrodi 13, 14, anch'essi disposti nella stessa apertura interna 22. In particolare, gli elementi risonanti 10a-10d, e gli associati elettrodi 13, 14, sono disposti internamente rispetto alle porzioni di massa 2a'-2d' relativamente alla cornice 20, in prossimità di assi centrali di simmetria della massa inerziale 2' (paralleli al primo ed al secondo asse x, y).

Nuovamente, gli elementi risonanti 10a-10d si estendono a partire da un rispettivo secondo ancoraggio 12 (i secondi ancoraggi 12 essendo in numero pari a quattro e

disposti nell'apertura interna 22), fino a collegarsi ad un rispettivo elemento elastico 8, in particolare alla terza porzione 8c dello stesso elemento elastico 8. Il punto di connessione c in cui ciascun elemento risonante 10a-10d si collega al rispettivo elemento elastico 8 si trova in questo caso in stretta prossimità del singolo primo ancoraggio 6, disposto centralmente alla struttura.

Tale seconda forma di realizzazione presenta il vantaggio di presentare una struttura compatta, tutta racchiusa internamente alla cornice 20 della massa inerziale 2'. Inoltre, la presenza di un singolo primo ancoraggio 6 per la stessa massa inerziale 2', disposto in corrispondenza del centro di gravità G della struttura, risulta vantaggiosa per la riduzione degli stress termomeccanici eventualmente agenti sulla struttura (ad esempio dovuti a deformazioni del package dell'accelerometro biassiale risonante 16). Sempre al fine della riduzione degli stress termomeccanici, risulta vantaggiosa la disposizione dei secondi ancoraggi 12 degli elementi risonanti 10a-10d internamente alla massa inerziale 2', anch'essi vicini al centro di gravità G della struttura.

Le figure 5 e 6 illustrano viste dall'alto delle strutture microelettromeccaniche di rilevamento 1, 1' precedentemente discusse, rispettivamente secondo la prima

e la seconda forma di realizzazione, ottenute mediante microscopio SEM. Si può notare la presenza di fori praticati attraverso l'intero spessore della massa inerziale 2, 2', al fine di consentirne il rilascio rispetto al substrato per attacco chimico di regioni di materiale sottostanti, ed inoltre la presenza di opportune piste di collegamento elettrico agli elementi della struttura. Inoltre, nelle stesse immagini, viene indicato con 30 il substrato delle strutture microelettromeccaniche di rilevamento 1, 1', costituito ad esempio di silicio, e vengono indicati con 31 gli elementi di arresto (stopper) disposti agli angoli della massa inerziale 2, 2'.

La struttura microelettromeccanica di rilevamento 1, 1' può essere realizzata con processi di microlavorazione superficiale, per esempio utilizzando il cosiddetto processo ThELMA (Thick Epipoly Layer for Microactuators and Accelerometers).

Il processo ThELMA consente la realizzazione di strutture sospese con spessori relativamente elevati (ad esempio dell'ordine di 10-15 μm), ancorate al substrato attraverso parti cedevoli (molle) e pertanto in grado di spostarsi almeno in un piano parallelo al substrato di silicio sottostante (il piano xy discusso sopra). Il processo consiste in diverse fasi di produzione:

- ossidazione termica del substrato;

- deposizione e modellazione (patterning) di interconnessioni elettriche orizzontali;
- deposizione e patterning di uno strato sacrificale;
- crescita epitassiale di uno strato strutturale (ad esempio costituito di polisilicio e con spessore di 15 μm);
- patterning dello strato strutturale mediante attacco di trincea (trench etching); e
- rimozione dell'ossido sacrificale e deposizione di metallizzazioni di contatto.

Da quanto è stato descritto ed illustrato precedentemente, i vantaggi che la presente invenzione consente di ottenere sono evidenti.

In particolare, la struttura microelettromeccanica di rilevamento 1, 1', abbinata ad un opportuno circuito elettronico di lettura 15, consente la realizzazione di accelerometri risonanti biassiali 16 di dimensioni molto ridotte, inferiori in particolare a quelle di accelerometri capacitivi ottenuti con la stessa tecnologia. La riduzione di dimensioni è ottenuta mediante l'utilizzo di una singola massa inerziale 2, 2' per il rilevamento di due componenti di accelerazione nel piano xy, ed eventualmente, anche se con sensibilità minore, di una ulteriore accelerazione angolare; ed inoltre mediante un'opportuna disposizione degli elementi risonanti 10a-10d rispetto alla stessa massa inerziale 2, 2'.

A parità di dimensioni complessive, risulta possibile ottenere elevati valori di sensibilità rispetto a strutture tradizionali. Nella prima forma di realizzazione, la struttura proposta consente ad esempio, con dimensioni di circa $550\text{ }\mu\text{m} \times 550\text{ }\mu\text{m}$, di ottenere una sensibilità superiore a 200 Hz/g . La sensibilità per l'accelerazione angolare risulta invece minore rispetto alla sensibilità per le accelerazioni lineari nel piano xy, ad esempio dell'ordine di $0,05\text{ Hz/(rad/s}^2\text{)}$.

La struttura proposta consente di ridurre gli effetti delle forze assiali spurie sulle travi risonanti, ed inoltre la misura differenziale di frequenza aumenta il range di linearità dell'accelerometro. In particolare, la presenza di due elementi risonanti sottoposti ad azione assiale di segno opposto per una data accelerazione lineare esterna permette la misura di accelerazione anche in presenza di uno stato di coazione generato ad esempio da una variazione termica.

Per finire, è chiaro che modifiche e varianti possono essere apportate a quanto è stato descritto ed illustrato sin qui, senza tuttavia scostarsi dalla portata della presente invenzione come definita nelle rivendicazioni allegate.

In particolare, è evidente che la forma geometrica della struttura microelettromeccanica di rilevamento 1, 1',

o di parti di essa, potrebbe differire da quanto descritto in precedenza. Inoltre, la struttura microelettromeccanica di rilevamento 1, 1' potrebbe comprendere un unico elemento risonante 10a-10d per ciascun asse di rilevamento x , y .

Le figure 7a e 7b riportano ulteriori varianti della struttura microelettromeccanica di rilevamento 1, in cui gli elementi risonanti 10a-10d ed i relativi secondi ancoraggi 12, così come i primi ancoraggi 6 della massa inerziale 2, sono disposti esternamente rispetto alla massa inerziale 2, nel piano xy . In tal caso, un elemento di arresto (stopper) 31 è disposto centralmente alla massa inerziale 2, all'interno di un'apertura ricavata attraverso la stessa massa inerziale 2, che per il resto è costituita da un unico corpo di forma genericamente quadrata in pianta.

In tali varianti, gli elementi elastici 8, ed in particolare le relative seconde porzioni 8b, di tipo ripiegato, sono collegati a sporgenze 34 della massa inerziale 2 (che sporgono rispetto all'ingombro, sostanzialmente quadrato, della stessa massa inerziale 2 nel piano xy); si noti che, in modo non illustrato, gli elementi elastici 8 possono anche in tal caso comprendere prime porzioni 8a, rettilinee, interposte tra rispettive seconde porzioni 8b e sporgenze 34.

In particolare, nella variante di figura 7a, le

sporgenze 34, in numero pari a quattro, sono disposte centralmente a rispettivi lati periferici della massa inerziale 2, mentre nella variante di figura 7b le sporgenze 34 sono disposte agli angoli della massa inerziale 2.

Le terze porzioni 8c, di tipo rettilineo, degli stessi elementi elastici 8 si estendono nuovamente in direzione trasversale ai rispettivi elementi risonanti 10a-10d, collegandosi ai rispettivi primi ancoraggi 6 della massa inerziale 2 (qui nuovamente in numero pari a quattro); gli elementi risonanti 10a-10d si collegano agli elementi elastici 8, in corrispondenza di un punto di connessione c della relativa terza porzione 8c, prossimo al relativo primo ancoraggio 6. Le seconde porzioni 8b di elementi elastici 8 associati ad elementi risonanti 10a-10d non appartenenti alla stessa coppia (ovvero non diretti lungo lo stesso asse) si trovano inoltre disposte parallele ed adiacenti a lati periferici opposti, tra loro affacciati, della massa inerziale 2.

Il funzionamento della struttura microelettromeccanica di rilevamento 1 nelle forme di realizzazione di figure 7a, 7b, ed in particolare le deformazioni degli elementi costitutivi in seguito ad accelerazioni esterne, non differiscono da quanto descritto in precedenza.

RIVENDICAZIONI

1. Struttura microelettromeccanica di rilevamento (1; 1') per un accelerometro biassiale risonante MEMS (16), comprendente:

- una massa inerziale (2; 2') ancorata ad un substrato (30) mediante elementi elastici (8), in modo tale da essere sospesa al di sopra di detto substrato (30), detti elementi elastici (8) essendo configurati in modo da consentire movimenti inerziali di rilevamento di detta massa inerziale (2; 2') lungo un primo (x) ed un secondo (y) asse di rilevamento appartenenti ad un piano (xy) di estensione principale di detta massa inerziale (2; 2'), in risposta a rispettive accelerazioni esterne lineari (a_x , a_y); ed

- almeno un primo (10a) ed un secondo (10b) elemento risonante, aventi una rispettiva estensione longitudinale, rispettivamente lungo detto primo (x) e secondo (y) asse di rilevamento, ed accoppiati meccanicamente a detta massa inerziale (2; 2') per il tramite di un rispettivo di detti elementi elastici (8), in modo tale da essere sottoposti ad una rispettiva sollecitazione assiale (N_1 , N_2), quando detta massa inerziale si sposta rispettivamente lungo detto primo (x) e secondo (y) asse di rilevamento.

2. Struttura secondo la rivendicazione 1, in cui detti primo (10a) e secondo (10b) elemento risonante sono accoppiati meccanicamente a detta massa inerziale (2; 2') per il tramite del rispettivo di detti elementi elastici (8), in modo tale da non avvertire sollecitazioni assiali

quando detta massa inerziale si sposta rispettivamente lungo detto secondo (y) e primo (x) asse, ovvero in una direzione trasversale alla rispettiva estensione longitudinale.

3. Struttura secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui ciascuno di detti elementi elastici (8) si estende a partire da un primo ancoraggio (6) di detta massa inerziale (2; 2') rispetto a detto substrato (30) fino a detta massa inerziale (2; 2'); ed in cui ciascuno di detti primo (10a) e secondo (10b) elemento risonante è ancorato a detto substrato (30) in corrispondenza di una sua prima estremità mediante un rispettivo secondo ancoraggio (12), ed è inoltre collegato meccanicamente al rispettivo di detti elementi elastici (8) in corrispondenza di una sua seconda estremità, in un punto di connessione (c) del rispettivo di detti elementi elastici (8) disposto in prossimità del relativo primo ancoraggio (6).

4. Struttura secondo la rivendicazione 3, in cui detto punto di connessione (c) è posizionato lungo detto rispettivo di detti elementi elastici (8), ad una distanza dal relativo primo ancoraggio (6) compresa tra 1/100 e 2/100 di una lunghezza (L) di detto rispettivo di detti elementi elastici (8), in direzione trasversale a detta estensione longitudinale dell'associato primo (10a) o secondo (10b) elemento risonante.

5. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui ciascuno di detti

elementi elastici (8) comprende: una porzione rettilinea (8a, 8c) estendentesi in direzione trasversale a detta estensione longitudinale dell'associato primo (10a) o secondo (10b) elemento risonante, ed una porzione ripiegata (8b), accoppiata meccanicamente, ed estendentesi trasversalmente a, detta porzione rettilinea (8a, 8c); detta porzione rettilinea (8a, 8c) essendo accoppiata all'associato primo (10a) o secondo (10b) elemento risonante e configurata in modo da flettersi per consentirne la sollecitazione assiale (N_1 , N_2) quando detta massa inerziale si sposta rispettivamente lungo detto primo (x) o secondo (y) asse, ovvero in direzione parallela alla estensione longitudinale dell'associato primo (10a) o secondo (10b) elemento risonante; e detta porzione ripiegata (8b) essendo configurata in modo da deformarsi quando detta massa inerziale si sposta rispettivamente lungo detto secondo (y) o primo (x) asse, ovvero in direzione trasversale alla estensione longitudinale dell'associato primo (10a) o secondo (10b) elemento risonante.

6. Struttura secondo la rivendicazione 5, in cui detta porzione ripiegata (8b) comprende una pluralità di segmenti rettilinei, tra loro paralleli e raccordati in corrispondenza di rispettive estremità; ed in cui detta porzione rettilinea (8a, 8c) comprende un primo segmento (8a) avente una prima estremità collegata a detta massa inerziale (2; 2') ed una seconda estremità collegata ad un

segmento rettilineo iniziale di detta porzione ripiegata (8b), ed un secondo segmento (8c) avente una prima estremità collegata al relativo primo ancoraggio (6) ed una seconda estremità collegata ad un segmento rettilineo terminale di detta porzione ripiegata (8b).

7. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre un terzo (10c) ed un quarto (10d) elemento risonante, aventi una estensione longitudinale rispettivamente lungo detto primo (x) e secondo (y) asse, parallelamente rispettivamente a detti primo (10a) e secondo (10b) elemento risonante, ed accoppiati meccanicamente a detta massa inerziale (2; 2') per il tramite di rispettivi di detti elementi elastici (8), in modo tale da essere sottoposti ad una rispettiva sollecitazione assiale (N_1 , N_2) di uguale intensità e segno opposto alla sollecitazione assiale rispettivamente di detto primo (10a) e secondo (10b) elemento risonante, quando detta massa inerziale si sposta rispettivamente lungo detto primo (x) e secondo (y) asse di rilevamento.

8. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detti primo (10a) e secondo (10b) elemento risonante sono disposti esternamente a detta massa inerziale (2) rispetto a detto piano (xy); ed in cui detta massa inerziale (2) presenta una porzione centrale (2e) e porzioni laterali (2a-2d), raccordate da detta porzione centrale (2e) e definenti tra loro aperture (4), che si aprono verso l'esterno di detta massa inerziale

(2); ed in cui detti elementi elastici (8) si estendono a partire da detta porzione centrale (2e), in parte attraverso dette aperture (4), in modo da raggiungere rispettivi primi ancoraggi (6) di detta massa inerziale (2) a detto substrato (30) disposti esternamente a detta massa inerziale (2) rispetto a detto piano (xy).

9. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detti primo (10a) e secondo (10b) elemento risonante sono disposti esternamente a detta massa inerziale (2) rispetto a detto piano (xy), e detta massa inerziale (2) presenta sporgenze (34) che si estendono in detto piano (xy) a partire da suoi lati periferici; detti elementi elastici (8) estendendosi a partire da rispettive sporgenze (34), fino a raggiungere rispettivi primi ancoraggi (6) di detta massa inerziale (2) a detto substrato (30), disposti esternamente a detta massa inerziale (2) rispetto a detto piano (xy); ed in cui detti elementi elastici (8) includono una porzione rettilinea (8c) estendentesi in direzione trasversale a detta estensione longitudinale dell'associato primo (10a) o secondo (10b) elemento risonante, ed una porzione ripiegata (8b), accoppiata meccanicamente, ed estendentesi trasversalmente a, detta porzione rettilinea (8c); detta porzione ripiegata (8b) estendendosi adiacente ad un primo di detti lati periferici di detta massa inerziale (2), e detto associato primo (10a) o secondo (10b) elemento risonante estendendosi adiacente ad un secondo di detti lati periferici, parallelo ed affacciato a detto primo lato

periferico.

10. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1-7, in cui detta massa inerziale (2') comprende una cornice (20) definente al suo interno un'apertura interna (22), e detti elementi elastici (8) si estendono interamente in detta apertura interna (22) a partire da detta cornice (20) fino a raggiungere un unico primo ancoraggio (6) di detta massa inerziale (2') a detto substrato (30), disposto centralmente rispetto a detta apertura interna (22); ed in cui detti primo (10a) e secondo (10b) elemento risonante sono disposti internamente a detta massa inerziale (2) rispetto a detto piano (xy), in detta apertura interna (22).

11. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detti elementi elastici (8) sono configurati in modo da consentire un ulteriore movimento inerziale di rilevamento di detta massa inerziale (2; 2'), ovvero una rotazione intorno ad un asse (z) ortogonale a detto piano (xy), in risposta ad una accelerazione esterna angolare (a_θ); ed in cui detti primo (10a) e secondo (10b) elemento risonante sono accoppiati meccanicamente a detta massa inerziale (2; 2') per il tramite di un rispettivo di detti elementi elastici (8), in modo tale da essere sottoposti ad una stessa sollecitazione assiale (N_θ), quando detta massa inerziale si sposta secondo detto ulteriore movimento inerziale di rilevamento.

12. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre primi

elettrodi (13) accoppiati elettricamente a detti primo (10a) e secondo (10b) elemento risonante per consentire di causarne uno stato di risonanza; e secondi elettrodi (14) accoppiati elettricamente a detti primo (10a) e secondo (10b) elemento risonante per consentire di rilevarne una rispettiva variazione di una frequenza di risonanza (f_1 , f_2), in funzione di detta rispettiva sollecitazione assiale (N_1 , N_2).

13. Accelerometro biassiale risonante (16), comprendente una struttura microelettromeccanica di rilevamento (1; 1') secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, e configurato in modo da rilevare una prima (a_x) ed una seconda (a_y) componente di accelerazione esterna lineare, dirette rispettivamente lungo detto primo (x) e secondo (y) asse di rilevamento.

14. Accelerometro secondo la rivendicazione 13, comprendente inoltre un circuito di lettura (15) accoppiato elettricamente a detta struttura microelettromeccanica di rilevamento (1; 1').

15. Apparecchio elettronico (18), comprendente un accelerometro biassiale risonante (16) secondo la rivendicazione 13 o 14, ed un'unità di controllo (19), collegata elettricamente a detto circuito di lettura (15).

p.i.: 1) STMICROELECTRONICS S.R.L.

2) POLITECNICO DI MILANO

Elena CERBARO

Elena CERBARO

(Iscrizione Albo nr. 426/BM)

CLAIMS

1. A microelectromechanical detection structure (1; 1') for a MEMS resonant biaxial accelerometer (16), comprising:

- an inertial mass (2; 2'), anchored to a substrate (30) by means of elastic elements (8) so as to be suspended above said substrate (30), said elastic elements (8) configured to enable inertial movements of detection of said inertial mass (2; 2') along a first detection axis (x) and a second detection axis (y) belonging to a plane (xy) of main extension of said inertial mass (2; 2'), responsive to respective linear external accelerations (a_x , a_y); and

- at least one first resonant element (10a) and one second resonant element (10b), having a respective longitudinal extension, respectively along said first detection axis (x) and said second detection axis (y), and mechanically coupled to said inertial mass (2; 2') through a respective one of said elastic elements (8), so as to undergo a respective axial stress (N_1 , N_2) when said inertial mass moves respectively along said first detection axis (x) and along said second detection axis (y).

2. The structure according to claim 1, wherein said first (10a) and second (10b) resonant elements are mechanically coupled to said inertial mass (2; 2') through the respective one of said elastic elements (8) in such a

way as to not undergo axial stresses when said inertial mass moves along said second detection axis (y) and said first detection axis (x), respectively, i.e., in a direction transverse to the respective longitudinal extension.

3. The structure according to claim 1 or 2, wherein each of said elastic elements (8) extends starting from a first anchorage (6) of said inertial mass (2; 2') to said substrate (30) as far as said inertial mass (2; 2'); and wherein each of said first (10a) and second (10b) resonant element is anchored to said substrate (30) at a first end thereof by means of a respective second anchorage (12), and is moreover mechanically connected to the respective one of said elastic elements (8) at a second end thereof, to a connection point (c) of the respective one of said elastic elements (8) arranged in the proximity of the corresponding first anchorage (6).

4. The structure according to claim 3, wherein said connection point (c) is positioned along said respective one of said elastic elements (8), at a distance from the corresponding first anchorage (6) comprised between $1/100$ and $2/100$ of a length (L) of said respective one of said elastic elements (8) in a direction transverse to said longitudinal extension of the associated first (10a) or second (10b) resonant element.

5. The structure according to any one of the preceding claims, wherein each of said elastic elements (8) comprises: a rectilinear portion (8a, 8c), extending in a direction transverse to said longitudinal extension of the associated first (10a) or second (10b) resonant element, and a folded portion (8b), which is mechanically coupled, and extends in a direction transverse to, said rectilinear portion (8a, 8c); said rectilinear portion (8a, 8c) being coupled to the associated first (10a) or second (10b) resonant element and being configured to bend to enable axial stress (N_1 , N_2) thereof when said inertial mass moves along said first (x) or second (y) detection axis, respectively, i.e., in a direction parallel to the longitudinal extension of the associated first (10a) or second (10b) resonant element; and said folded portion (8b) being configured to undergo deformation when said inertial mass moves along said second (y) or first (x) detection axis, respectively, i.e., in a direction transverse to the longitudinal extension of the associated first (10a) or second (10b) resonant element.

6. The structure according to claim 5, wherein said folded portion (8b) comprises a plurality of rectilinear segments, parallel to one another and joined at respective ends; and wherein said rectilinear portion (8a, 8c) comprises a first segment (8a) having a first end connected

to said inertial mass (2; 2') and a second end connected to an initial rectilinear segment of said folded portion (8b), and a second segment (8c) having a first end connected to the corresponding first anchorage (6) and a second end connected to a terminal rectilinear segment of said folded portion (8b).

7. The structure according to any one of the preceding claims, further comprising a third (10c) and a fourth (10d) resonant elements, having a longitudinal extension, respectively, along said first (x) and second (y) detection axis, in a direction parallel, respectively, to said first (10a) and second (10b) resonant element, and mechanically coupled to said inertial mass (2; 2') through respective ones of said elastic elements (8), in such a way as to undergo a respective axial stress (N_1 , N_2) of the same intensity and opposite sign with respect to the axial stress of said first (10a) and second (10b) resonant element, respectively, when said inertial mass moves along said first (x) and second (y) detection axis, respectively.

8. The structure according to any one of the preceding claims, wherein said first (10a) and second (10b) resonant elements are arranged externally to said inertial mass (2) with respect to said plane (xy); and wherein said inertial mass (2) has a central portion (2e) and side portions (2a-2d), which are connected by said central

portion (2e) and define between them openings (4), which open towards the outside of said inertial mass (2); and wherein said elastic elements (8) extend starting from said central portion (2e), in part through said openings (4) so as to reach respective first anchorages (6) of said inertial mass (2) to said substrate (30), which are set externally to said inertial mass (2) with respect to said plane (xy).

9. The structure according to any one of the preceding claims, wherein said first (10a) and second (10b) resonant elements are arranged externally to said inertial mass (2) with respect to said plane (xy), and said inertial mass (2) has projections (34) that extend in said plane (xy) starting from peripheral sides of said inertial mass; said elastic elements (8) extending starting from respective projections (34) until they reach respective first anchorages (6) of said inertial mass (2) to said substrate (30), said first anchorages (6) being arranged externally to said inertial mass (2) with respect to said plane (xy); and wherein said elastic elements (8) include a rectilinear portion (8c), which extends in a direction transverse to said longitudinal extension of the associated first (10a) or second (10b) resonant element, and a folded portion (8b), which is mechanically coupled, and extends in a direction transverse to, said rectilinear portion (8c); said folded portion (8b) extending adjacent to a first one

of said peripheral sides of said inertial mass (2), and said associated first (10a) or second (10b) resonant element extending adjacent to a second one of said peripheral sides, parallel to and facing said first peripheral side.

10. The structure according to any one of claims 1-7, wherein said inertial mass (2') comprises a frame (20) defining inside it an internal opening (22), and said elastic elements (8) extend entirely in said internal opening (22) starting from said frame (20) until they reach a single first anchorage (6) of said inertial mass (2') to said substrate (30), said single first anchorage (6) being arranged centrally with respect to said internal opening (22); and wherein said first (10a) and second (10b) resonant elements are set internally to said inertial mass (2) with respect to said plane (xy), in said internal opening (22).

11. The structure according to any one of the preceding claims, wherein said elastic elements (8) are configured to enable a further inertial movement of detection of said inertial mass (2; 2'), i.e., a rotation about an axis (z) orthogonal to said plane (xy), in response to an external angular acceleration (a.); and wherein said first (10a) and second (10b) resonant elements are mechanically coupled to said inertial mass (2; 2') through a respective one of said elastic elements (8) in

such a way as to undergo a same axial stress (N), when said inertial mass moves according to said further inertial movement of detection.

12. The structure according to any one of the preceding claims, further comprising first electrodes (13), electrically coupled to said first (10a) and second (10b) resonant elements to enable generation of a resonance state thereof; and second electrodes (14), electrically coupled to said first (10a) and second (10b) resonant elements to enable detection of a respective variation of a resonance frequency (f_1 , f_2), as a function of said respective axial stress (N_1 , N_2).

13. A resonant biaxial accelerometer (16), comprising a microelectromechanical detection structure (1; 1') according to any one of the preceding claims, and configured to detect a first (a_x) and a second (a_y) linear external acceleration components, directed, respectively, along said first (x) and second (y) detection axes.

14. The accelerometer according to claim 13, further comprising a reading circuit (15), electrically coupled to said microelectromechanical detection structure (1; 1').

15. An electronic apparatus (18), comprising a resonant biaxial accelerometer (16) according to claim 13 or 14, and a control unit (19), electrically connected to said reading circuit (15).

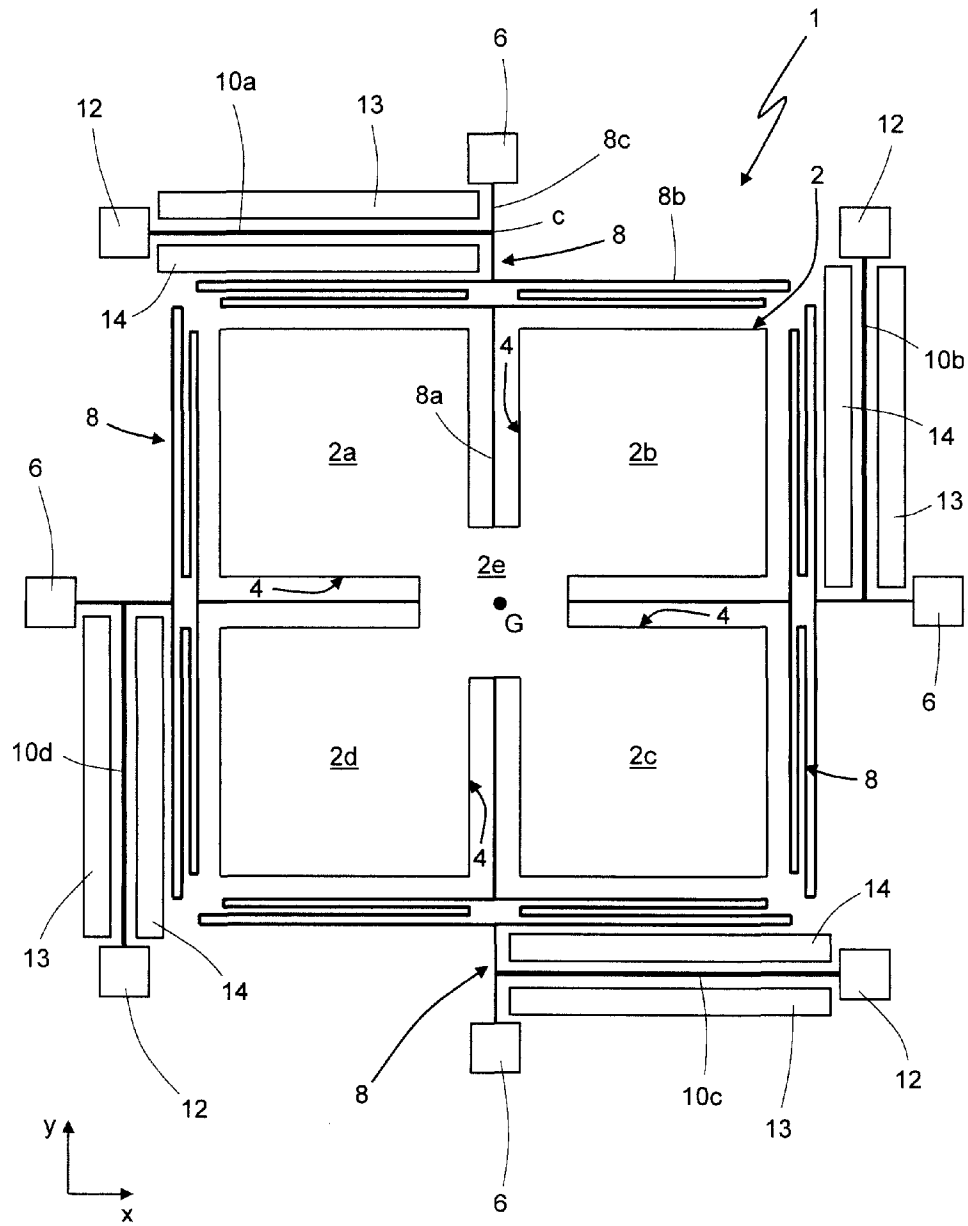
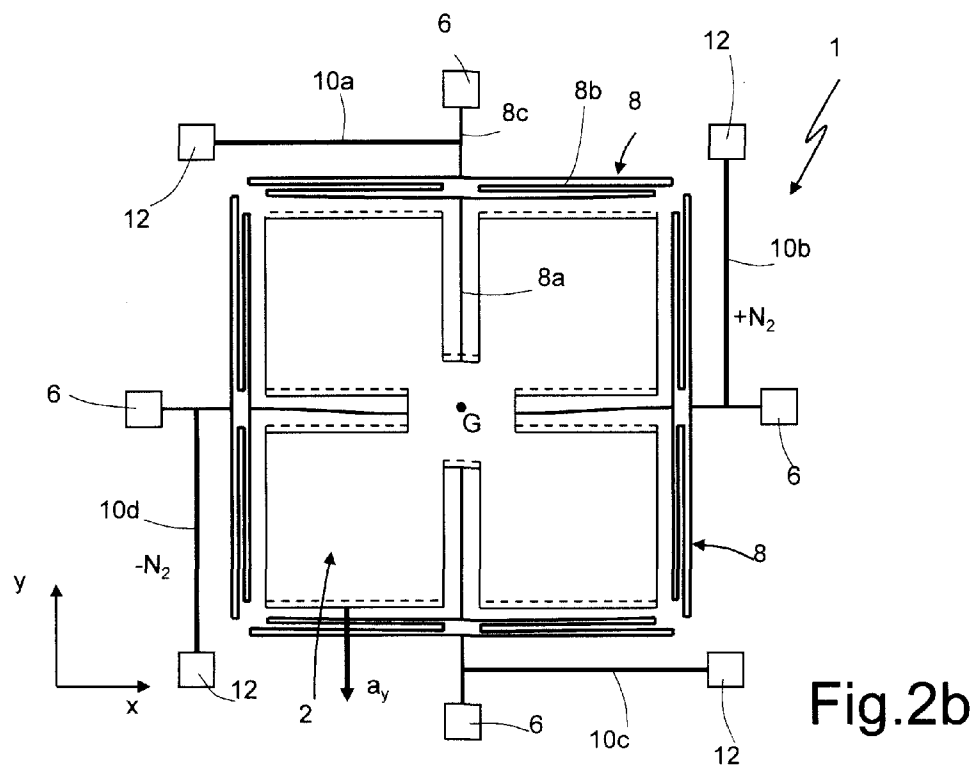
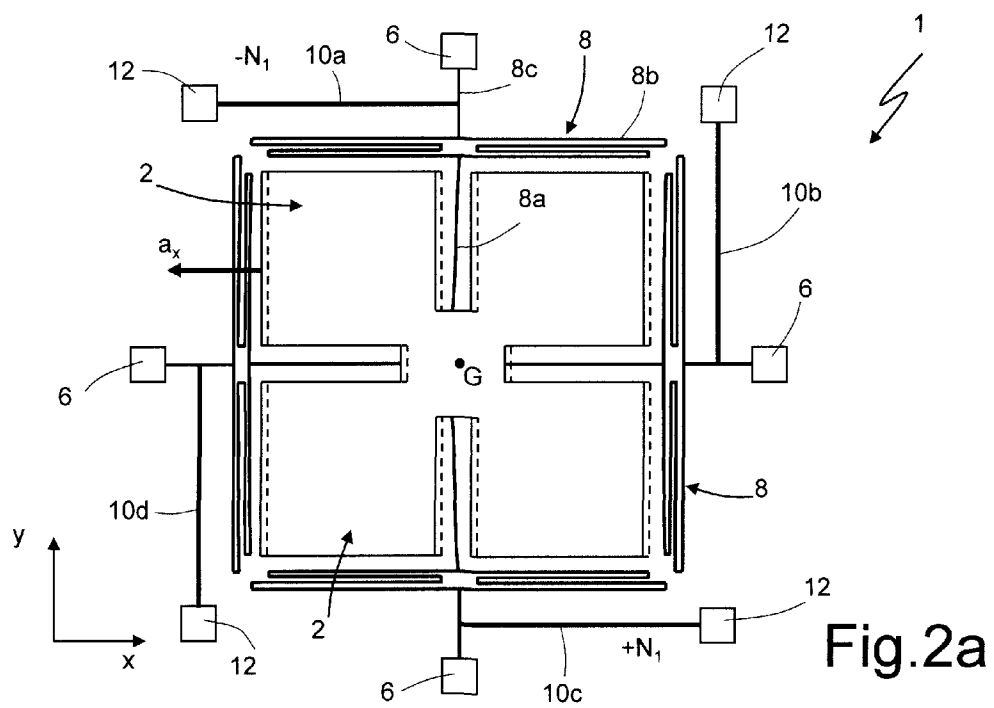


Fig.1



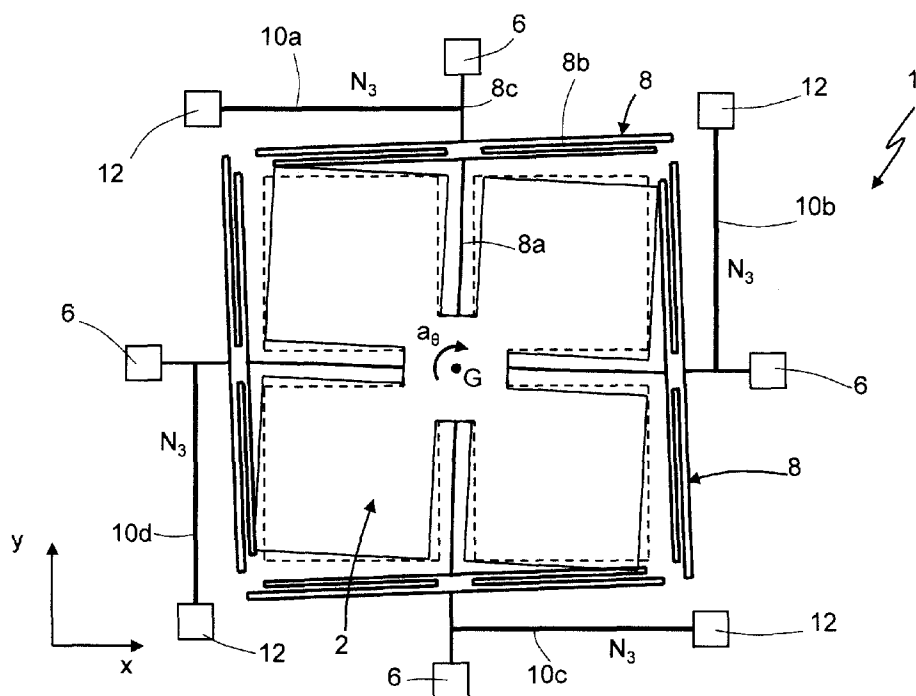


Fig. 2c

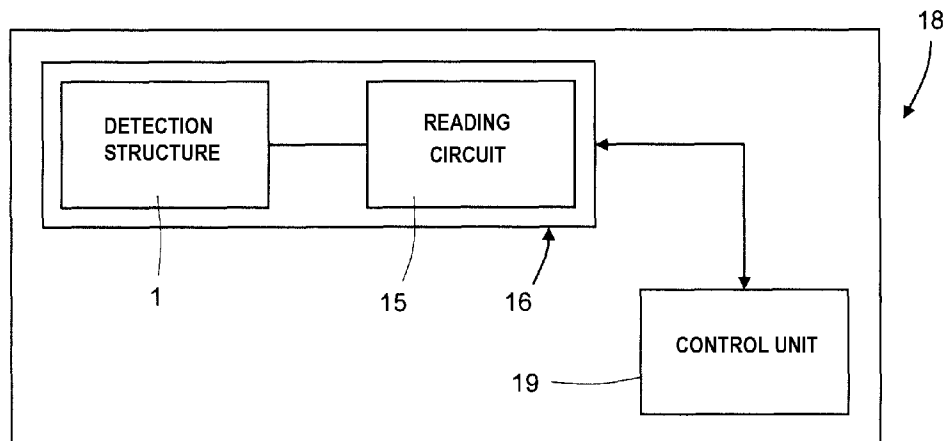


Fig. 3

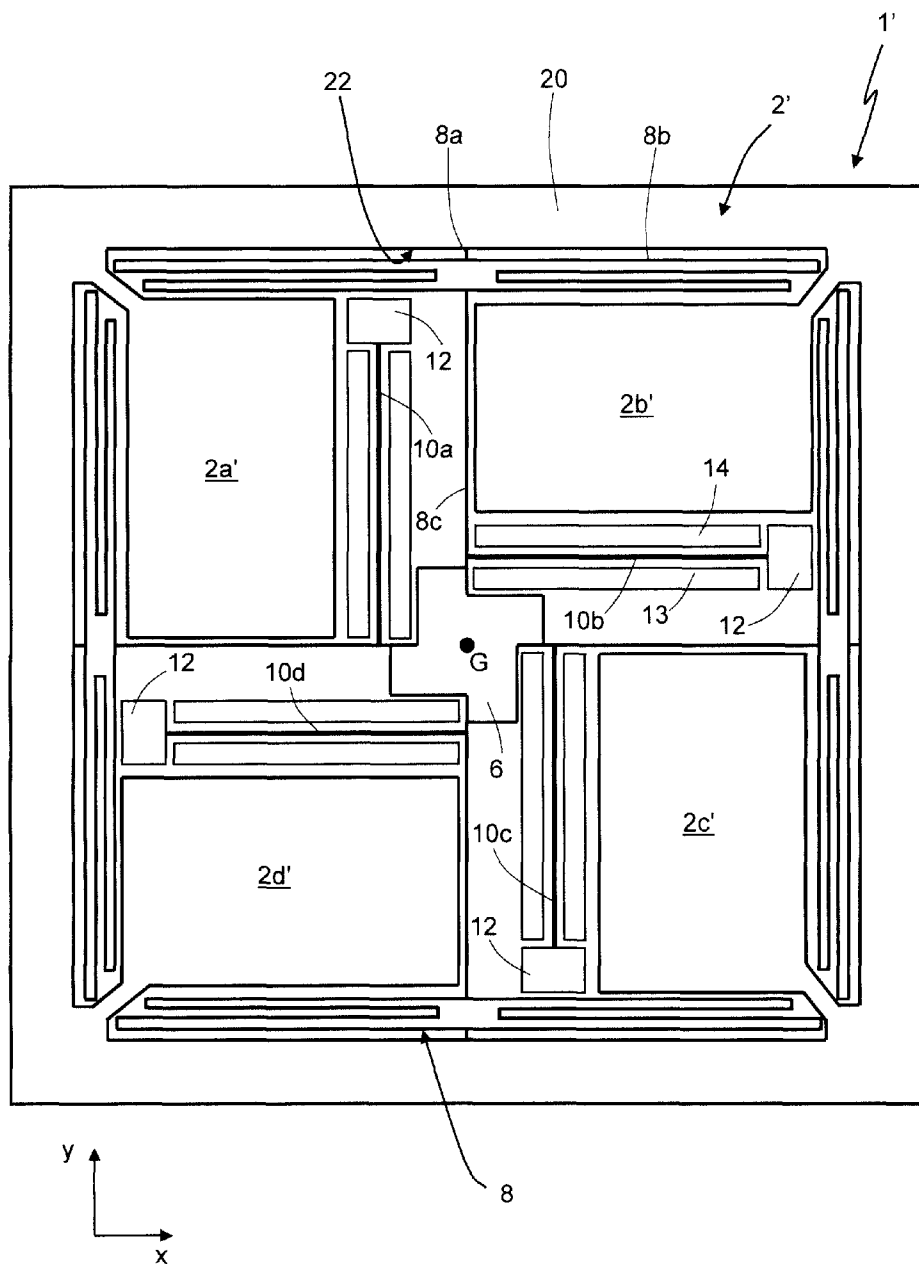
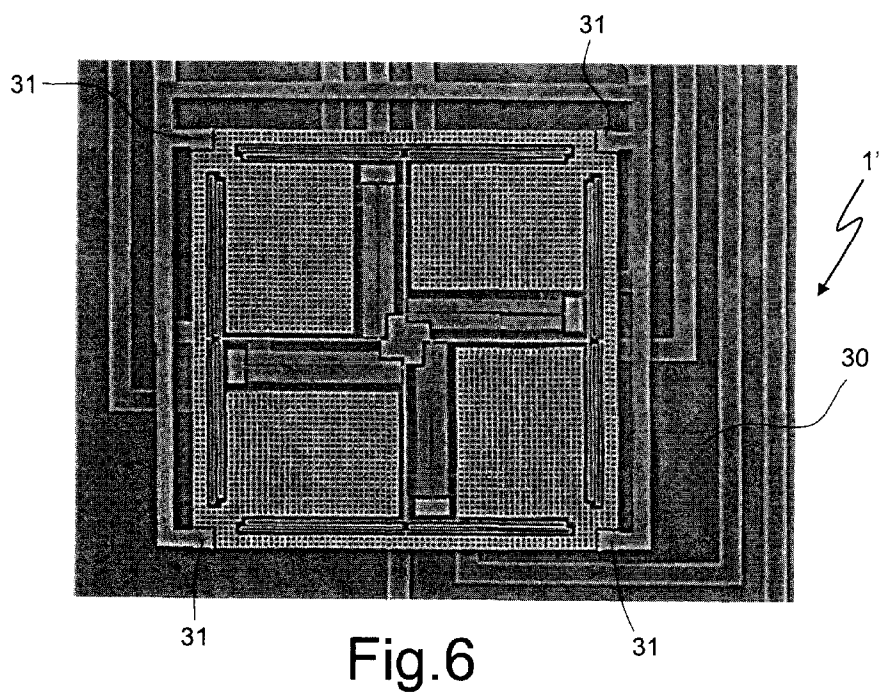
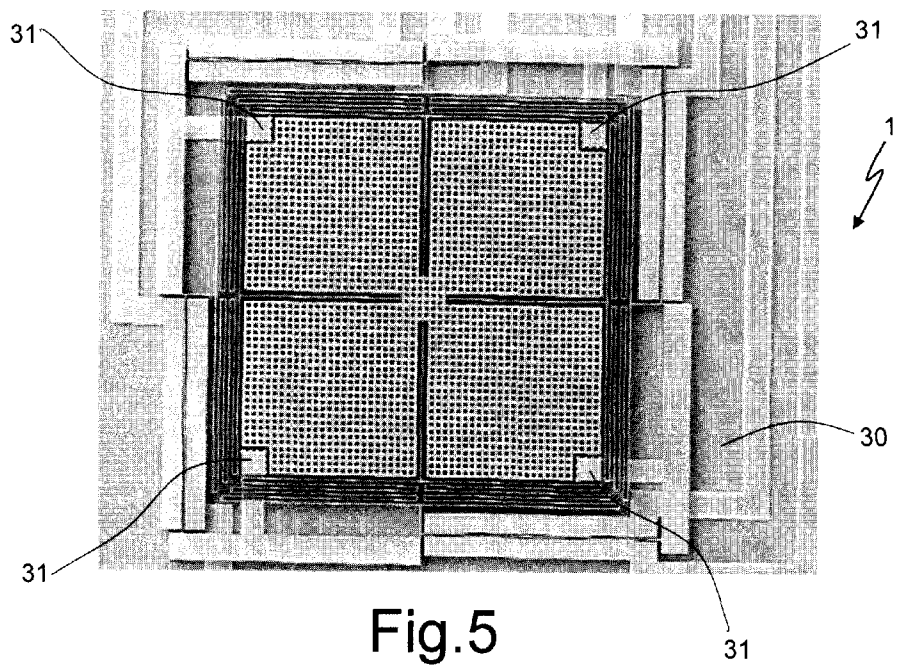


Fig.4



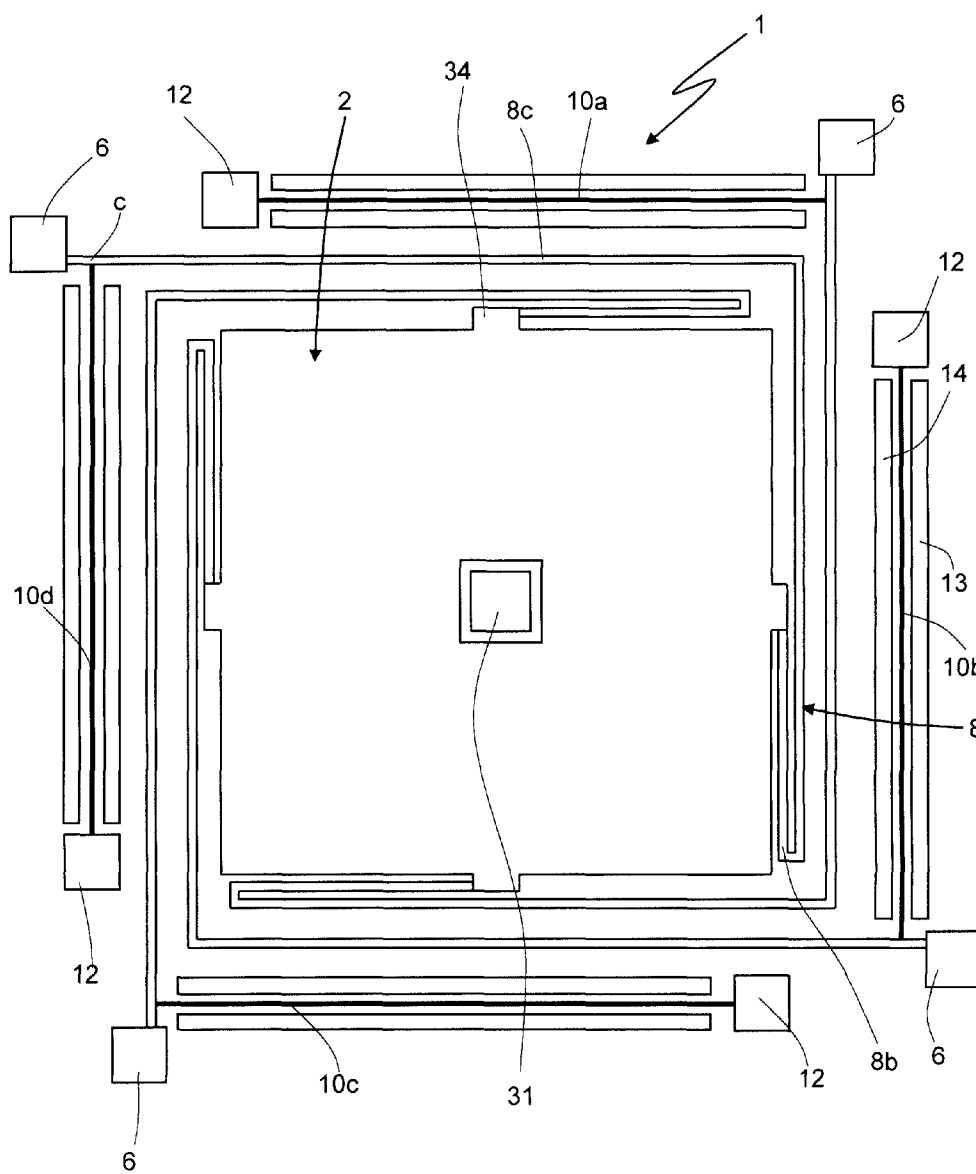


Fig.7a

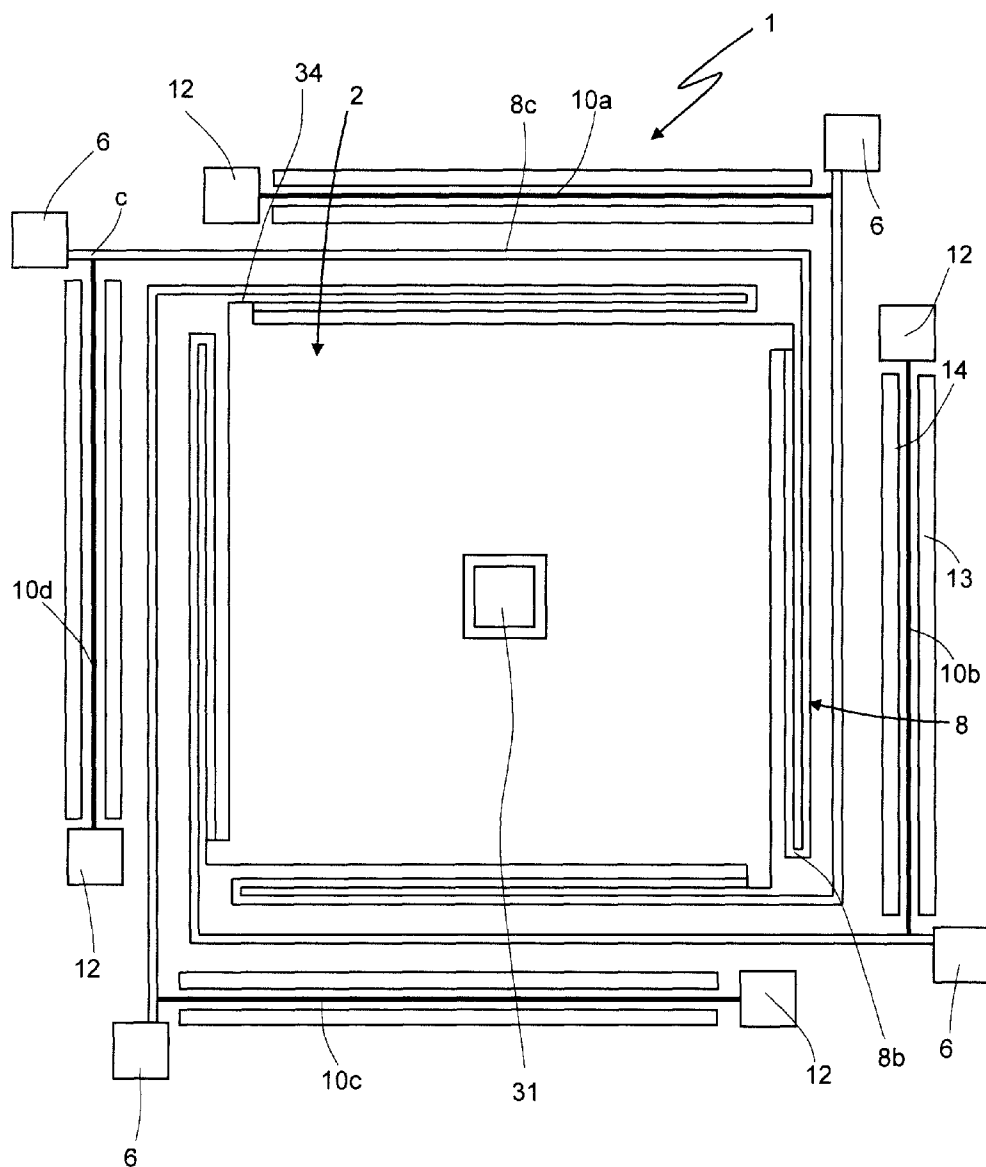


Fig.7b