

# ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102008901690339A1

Publication Date

20100623

Applicant

STMICROELECTRONICS (ROUSSET) SAS

Title

GIROSCOPIO MICROELETTROMECCANICO CON MIGLIORATA REIEZIONE  
DI DISTURBI DI ACCELERAZIONE

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"GIROSCOPIO MICROELETTROMECCANICO CON MIGLIORATA REIEZIONE  
DI DISTURBI DI ACCELERAZIONE"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI, 2

AGRATE BRIANZA (MI)

Inventori: CAZZANIGA Gabriele, CORONATO Luca, CALCATERRA  
Giacomo

\*\*\*

La presente invenzione è relativa ad una struttura microelettromeccanica, in particolare un giroscopio sensibile ad accelerazioni angolari di imbardata (yaw), dotata di migliorate caratteristiche meccaniche, in particolare nella reiezione di disturbi di accelerazione.

Come noto, le tecniche di microfabbricazione consentono la realizzazione di strutture o sistemi microelettromeccanici (cosiddetti MEMS, dall'inglese Micro Electro Mechanical System) all'interno di strati di materiale semiconduttore, che sono stati depositati (ad esempio uno strato di silicio policristallino) o cresciuti (ad esempio uno strato epitassiale) al di sopra di strati sacrificali, che vengono rimossi tramite attacco chimico. Sensori inerziali, accelerometri e giroscopi realizzati con

tale tecnologia stanno avendo un crescente successo, ad esempio nel campo "automotive", nella navigazione inerziale, o nel settore dei dispositivi portatili.

In particolare, sono noti giroscopi integrati di materiale semiconduttore realizzati con tecnologia MEMS. Tali giroscopi operano in base al teorema delle accelerazioni relative, sfruttando l'accelerazione di Coriolis. Quando viene applicata una velocità angolare ad una massa mobile che si muove di una velocità lineare, la massa mobile "sente" una forza apparente, chiamata forza di Coriolis, che ne determina uno spostamento in direzione perpendicolare alla direzione della velocità lineare e all'asse intorno al quale viene applicata la velocità angolare. La massa mobile viene supportata tramite molle che ne consentono uno spostamento nella direzione della forza apparente. In base alla legge di Hooke, lo spostamento è proporzionale alla forza apparente, in modo tale che dallo spostamento della massa mobile è possibile rilevare la forza di Coriolis ed il valore della velocità angolare che l'ha generata. Lo spostamento della massa mobile può ad esempio essere rilevato in modo capacitivo, determinando, in condizione di risonanza, le variazioni di capacità causate dal movimento di elettrodi mobili,

**Elena CERBARO**  
*(Iscrizione Albo nr. 426/BM)*

solidali alla massa mobile e interdigitati ad elettrodi fissi.

La pubblicazione della domanda di brevetto europea EP-A-1 832 841 e la domanda di brevetto statunitense 60/971.496, depositate dalla titolare della presente domanda, descrivono un sensore integrato microelettromeccanico con movimento di azionamento rotatorio e sensibile a velocità angolari di imbardata.

Tale sensore microelettromeccanico comprende un'unica massa di azionamento, ancorata ad un substrato ed azionata con moto rotatorio. All'interno della massa di azionamento sono realizzate aperture passanti in cui sono disposte corrispondenti masse di rilevamento, le quali sono racchiuse nell'ingombro della massa di azionamento, sono sospese rispetto al substrato e collegate alla massa di azionamento tramite elementi flessibili. Ciascuna massa di rilevamento è solidale alla massa di azionamento durante il suo moto rotatorio, e presenta inoltre un ulteriore grado di libertà di movimento in funzione di una sollecitazione esterna, in particolare una forza di Coriolis, agente sul sensore. Gli elementi flessibili, grazie alla loro particolare realizzazione, consentono alle masse di rilevamento un movimento di rilevamento lineare lungo una direzione radiale appartenente al piano del sensore, in

risposta ad un'accelerazione di Coriolis; tale movimento di rilevamento è sostanzialmente disaccoppiato rispetto al movimento di azionamento della massa di azionamento. Tale struttura microelettromeccanica, oltre ad essere compatta (in quanto prevede una sola massa di azionamento che racchiude nel suo ingombro più masse di rilevamento), permette di ottenere con piccole modifiche strutturali, un giroscopio (e/o eventualmente un accelerometro, a seconda delle connessioni elettriche implementate) mono-, bi- o triassiale, al contempo assicurando un ottimo disaccoppiamento della dinamica di azionamento da quella di rilevamento.

La figura 1 mostra un esempio di realizzazione di un giroscopio microelettromeccanico monoassiale, indicato con 1, realizzato secondo gli insegnamenti contenuti nelle suddette domande di brevetto.

Il giroscopio 1 è realizzato in un die (o piastrina) 2, comprendente un substrato 2a di materiale semiconduttore (ad esempio silicio), ed un frame (o cornice) 2b definente al suo interno una regione aperta 2c, sovrastante il substrato 2a, destinata ad ospitare strutture di rilevamento del giroscopio 1 (come descritto in dettaglio in seguito). La regione aperta 2c ha configurazione genericamente quadrata o rettangolare in un piano orizzontale (nel seguito, piano del sensore xy), definito

da un primo e da un secondo asse orizzontale  $x, y$ , solidali al die 2; la cornice 2b presenta lati sostanzialmente paralleli agli assi orizzontali  $x, y$ . Piazzole di contatto 2d (cosiddette "die pad") sono disposte lungo un lato della cornice 2b, allineate ad esempio lungo il primo asse orizzontale  $x$ ; in modo non illustrato, le piazzole di contatto 2d permettono di contattare elettricamente dall'esterno le strutture di rilevamento del giroscopio 1.

Il giroscopio 1 comprende una struttura di azionamento, alloggiata all'interno della regione aperta 2c e formata da una massa di azionamento 3 e da un gruppo di azionamento 4.

La massa di azionamento 3 ha, ad esempio, una geometria generalmente circolare a simmetria radiale, con una configurazione sostanzialmente planare con estensione principale nel piano del sensore  $xy$ , e dimensione trascurabile, rispetto all'estensione principale, in una direzione parallela ad un asse verticale  $z$ , formante con il primo ed il secondo asse orizzontale  $x, y$  una terna di assi ortogonali, solidali al die 2. La massa di azionamento 3 definisce centralmente uno spazio vuoto 6, il cui centro 0 coincide con il baricentro ed il centro di simmetria dell'intera struttura.

La massa di azionamento 3 è ancorata al substrato 2a per mezzo di un primo ancoraggio 7a posto in corrispondenza

del centro  $O$ , a cui è collegata attraverso primi elementi elastici di ancoraggio 8a. La massa di azionamento 3 è eventualmente ancorata al substrato 2a mediante ulteriori ancoraggi (non illustrati), disposti esternamente alla massa di azionamento 3 stessa, a cui è collegata mediante ulteriori elementi elastici di ancoraggio (non illustrati), ad esempio del tipo ripiegato (folded). Il primo e gli ulteriori elementi elastici di ancoraggio consentono un movimento rotatorio della massa di azionamento 3 attorno ad un asse di azionamento passante per il centro  $O$ , parallelo all'asse verticale  $z$  e perpendicolare al piano del sensore  $xy$ , con una velocità angolare di azionamento  $\vec{\Omega}_a$ .

La massa di azionamento 3 presenta una coppia di aperture passanti 9a, 9b, allineate in direzione radiale, ad esempio lungo il secondo asse orizzontale  $y$ , e disposte da parti opposte rispetto allo spazio vuoto 6; le aperture passanti 9a, 9b hanno in pianta una forma sostanzialmente rettangolare, con estensione principale in una direzione trasversale alla stessa direzione radiale.

Il gruppo di azionamento 4 comprende una pluralità di bracci azionati 10, estendentisi esternamente dalla massa di azionamento 3 in direzione radiale ed in maniera angolarmente equispaziata, ed una pluralità di primi e secondi bracci di azionamento 12a, 12b, estendentisi

parallelamente a, e da parti opposte di, rispettivi bracci azionati 10. Ciascun braccio azionato 10 porta una pluralità di primi elettrodi 13, estendentisi perpendicolarmente a, e da entrambi i lati del braccio azionato stesso. Inoltre, ciascun primo e secondo braccio di azionamento 12a, 12b porta rispettivi secondi elettrodi 14a, 14b, estendentisi verso il rispettivo braccio azionato 10, ed interdigitati ai relativi primi elettrodi 13 (secondo una struttura a pettine, nota come "comb-finger"). I primi bracci di azionamento 12a sono disposti tutti su uno stesso lato dei rispettivi bracci azionati 10, e sono polarizzati tutti ad uno stesso primo potenziale; analogamente i secondi bracci di azionamento 12b sono disposti tutti sul lato opposto dei rispettivi bracci azionati 10, e sono polarizzati tutti ad uno stesso secondo potenziale. Un circuito di azionamento (non illustrato) è collegato ai secondi elettrodi 14a, 14b per applicare il primo ed il secondo potenziale e determinare, mediante l'attrazione reciproca ed alternata degli elettrodi, un andamento rotatorio oscillatorio della massa di azionamento 3 attorno all'asse di azionamento, ad una determinata frequenza di oscillazione e velocità angolare di

azionamento  $\bar{\Omega}_a$ .

Il giroscopio 1 comprende inoltre una coppia di sensori di accelerazione con asse parallelo alla suddetta direzione radiale, ed in particolare una coppia di masse di rilevamento 15a, 15b alloggiata all'interno delle aperture passanti 9a, 9b; le masse di rilevamento 15a, 15b presentano ad esempio una forma generalmente rettangolare con lati paralleli a corrispondenti lati delle aperture passanti 9a, 9b, sono sospese rispetto al substrato 2a e collegate alla massa di azionamento 3 tramite elementi elastici di supporto 18. Gli elementi elastici di supporto 18 si dipartono ad esempio a partire dai lati maggiori opposti di ciascuna massa di rilevamento, lungo la direzione radiale. In particolare, gli elementi elastici di supporto 18 sono rigidi rispetto al moto di azionamento della massa di azionamento 3 (in modo tale che le masse di rilevamento 15a, 15b seguano la massa di azionamento 3 nel suo movimento rotatorio), e consentono inoltre un movimento lineare delle rispettive masse di rilevamento lungo la suddetta direzione radiale. Inoltre, alle seconde masse di rilevamento 15a, 15b sono accoppiati elettrodi mobili 20 estendentisi, ad esempio, a partire da rispettivi lati minori, lungo una direzione ortogonale alla direzione radiale; tali elettrodi mobili 20 formano condensatori di rilevamento a facce piane e parallele con rispettivi primi

e secondi elettrodi fissi 22a, 22b, ancorati alla massa di azionamento 3. In particolare, ciascun elettrodo mobile 20 forma un primo condensatore di rilevamento  $C_1$  con un rispettivo primo elettrodo fisso 22a (ad esempio quello radialmente più interno rispetto al centro O), ed un secondo condensatore di rilevamento  $C_2$  con un rispettivo secondo elettrodo fisso 22b (ad esempio quello radialmente più esterno rispetto al centro O).

In uso, il giroscopio 1 è in grado di rilevare una velocità angolare  $\vec{\Omega}_z$  (di imbardata), agente attorno all'asse verticale z. In particolare, tale velocità angolare  $\vec{\Omega}_z$  da rilevare genera una forza di Coriolis  $\vec{F}_c$  sulle masse di rilevamento 15a, 15b diretta in direzione radiale (diretta quindi come una forza centripeta agente sulle stesse masse), causando lo spostamento delle masse di rilevamento ed una variazione capacitiva dei relativi condensatori di rilevamento  $C_1, C_2$ . Il valore di tale variazione capacitiva è proporzionale alla velocità angolare  $\vec{\Omega}_z$ , che può dunque essere determinata in modo di per sé noto tramite un circuito di lettura, operante secondo uno schema differenziale. In particolare, si realizzano opportuni collegamenti tra gli elettrodi fissi 22a, 22b e mobili 20, in modo tale che la differenza tra

grandezze elettriche correlate alle variazioni dei primi e secondi condensatori di rilevamento  $C_1$ ,  $C_2$  venga amplificata in modo differenziale.

In particolare, in presenza della forza di Coriolis dovuta ad un'accelerazione angolare di imbardata agente sulla struttura, le masse di rilevamento 15a, 15b si muovono in controfase nella direzione radiale (in altre parole, si spostano in versi opposti rispetto alla direzione radiale), così che l'elettronica di lettura differenziale genera una grandezza elettrica di uscita amplificata. Al contrario, eventuali accelerazioni esterne agenti sulla struttura nella direzione radiale (ad esempio accelerazioni dovute a rumore ambientale) provocano un movimento in fase delle stesse masse di rilevamento 15a, 15b, che pertanto non viene letto dall'elettronica di lettura (non provocandone cioè un'uscita apprezzabile).

In sostanza, tali accelerazioni esterne vengono idealmente reiettate in modo automatico in seguito alla lettura differenziale. Infatti, mentre il segnale utile di Coriolis tende a sbilanciare in direzioni radiali opposte le masse di rilevamento 15a, 15b, accelerazioni esterne determinano variazioni con lo stesso segno; eseguendo la

differenza dei segnali di rilevamento generati dai due sensori di accelerazione è possibile dunque misurare il contributo di Coriolis e reiettare le accelerazioni spurie.

Il moto di azionamento rotatorio genera inoltre una accelerazione centrifuga, che agisce sulle masse di rilevamento 15a, 15b, sostanzialmente in maniera analoga alla suddetta accelerazione di Coriolis (determinandone cioè uno spostamento in versi opposti). Tuttavia, l'accelerazione centrifuga provoca un contributo in uscita avente una frequenza doppia rispetto all'accelerazione di Coriolis, e può pertanto essere filtrato in modo opportuno dall'elettronica di lettura.

Nonostante il giroscopio descritto nelle suddette domande di brevetto costituisca un notevole perfezionamento rispetto ad altre strutture di tipo noto, esso non risulta del tutto ottimizzato dal punto di vista delle caratteristiche elettriche e dell'immunità ai disturbi. In particolare, esso risulta, in determinate condizioni operative reali, non perfettamente immune alle accelerazioni esterne (ad esempio accelerazioni di rumore), ed inoltre agli effetti dell'accelerazione centrifuga agente sulla struttura a causa del moto di azionamento

rotatorio.

Scopo della presente invenzione è pertanto quello di migliorare ulteriormente la struttura del giroscopio microelettromeccanico, in particolare relativamente alla sensibilità ai disturbi di accelerazione esterni ed alla accelerazione centrifuga.

Secondo la presente invenzione viene pertanto fornita una struttura microelettromeccanica, come definita nella rivendicazione 1.

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

- la figura 1 mostra una vista schematica dall'alto di un giroscopio microelettromeccanico, di tipo noto;

- la figura 2 mostra una rappresentazione schematica dei colleganti elastici di masse di rilevamento del giroscopio di figura 1;

- le figure 3a, 3b e 4a, 4b mostrano grafici di grandezze elettriche relative al giroscopio di figura 1;

- la figura 5 mostra una vista schematica dall'alto di un giroscopio microelettromeccanico secondo una prima forma di realizzazione della presente invenzione;

- la figura 6 mostra una rappresentazione schematica

dei colleganti elastici di masse di rilevamento del giroscopio di figura 5;

- le figure 7a, 7b e 8a, 8b mostrano grafici di grandezze elettriche relative al giroscopio di figura 5;

- la figura 9 mostra una vista schematica dall'alto di una seconda forma di realizzazione del giroscopio microelettromeccanico;

- le figure 10, 11a e 11b mostrano ingrandimenti progressivi di porzioni di elementi del giroscopio di figura 9;

- le figure 12a e 12b mostrano grafici di grandezze elettriche relative al giroscopio di figura 9;

- la figura 13 mostra una ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione, relativa ad un giroscopio triassiale; e

- la figura 14 mostra uno schema a blocchi semplificato di un dispositivo elettronico dotato di un giroscopio microelettromeccanico secondo l'invenzione.

La presente richiedente ha osservato, e verificato sperimentalmente, che la non perfetta immunità ai disturbi di accelerazione esterni che affligge il giroscopio precedentemente descritto è imputabile a possibili variazioni (spread) di processo, ed in particolare ad eventuali differenze nelle caratteristiche meccaniche delle masse di rilevamento e dei relativi elementi elastici, che

da tali spread possono derivare.

In dettaglio, come mostrato in figura 2 (in cui sono schematizzati i collegamenti elastici tra le masse di rilevamento 15a, 15b e la massa di azionamento 3, per il tramite degli elementi elastici di supporto 18), i modi di vibrare delle masse di rilevamento 15a, 15b sono disaccoppiati ed idealmente alla stessa frequenza.

A causa degli spread di processo, le frequenze di risonanza delle due masse di rilevamento 15a, 15b possono tuttavia non risultare perfettamente coincidenti (ad esempio possono differire di 10-20 Hz), e ciò causa, per fattori di merito  $Q$  elevati, una cattiva reiezione ai disturbi di accelerazione esterni. Infatti, accelerazioni esterne aventi frequenza prossima alle frequenze di risonanza delle masse di rilevamento 15a, 15b possono generare risposte anche notevolmente differenti nelle due masse di rilevamento, generando così un'uscita non nulla dalla relativa elettronica di lettura (nonostante lo schema differenziale adottato sia in grado idealmente di reiettare tali disturbi). Considerando che la frequenza di risonanza delle masse di rilevamento ha valori tipici dell'ordine dei 4-5 KHz, è evidente che anche rumore ambientale con frequenza audio può generare, per i motivi sopra esposti, disturbi anche rilevanti in uscita.

Tale comportamento è stato verificato dalla

richiedente mediante opportune simulazioni numeriche. Le figure 3a e 3b mostrano i risultati di un'elaborazione numerica in cui si è simulato uno spread di processo applicando una differenza dell'1% nella rigidità degli elementi elastici di supporto 18 associati alle masse di rilevamento 15a, 15b, e si è applicato un rumore casuale di spostamento dell'ancoraggio 7a (e di eventuali ulteriori ancoraggi) della massa di azionamento per simulare un'eccitazione di accelerazione esterna. In particolare, le figure 3a e 3b mostrano, rispettivamente in scala lineare e logaritmica, l'uscita OUT dell'elettronica di lettura del giroscopio 1 (e quindi il risultato delle operazioni di amplificazione e demodulazione dei segnali in uscita dai condensatori di rilevamento), mentre le figure 4a e 4b mostrano rispettivamente l'ampiezza (Mag) e la fase della funzione di trasferimento meccanica delle masse di rilevamento 15a, 15b. Da tali grafici, è evidente la presenza di due distinti picchi in frequenza distanziati di circa 20 Hz, dovuti alla differente frequenza di risonanza delle due masse di rilevamento 15a, 15b, ed inoltre è evidente la presenza di un'uscita non nulla dall'elettronica di lettura in presenza di un'accelerazione di rumore (avente anzi valori che possono anche essere confrontabili con i valori assunti durante il rilevamento di accelerazioni angolari).

Per risolvere i suddetti problemi, un aspetto della presente invenzione prevede di accoppiare meccanicamente (in particolare tramite opportuni elementi elastici) le due masse di rilevamento, in modo tale da accoppiarne i modi di vibrazione di rilevamento.

In particolare, si faccia riferimento alla figura 5 in cui gli stessi numeri di riferimento vengono utilizzati per indicare elementi simili ad altri già descritti in precedenza, il giroscopio microelettromeccanico, qui indicato con 30, differisce dal giroscopio 1 di figura 1 sostanzialmente per il fatto di comprendere elementi elastici di accoppiamento 32a, 32b atti ad accoppiare elasticamente tra di loro le masse di rilevamento 15a, 15b.

È in tal caso presente un'unica apertura passante, qui indicata con 34, coincidente inoltre con lo spazio vuoto, qui indicato con 6', definito centralmente dalla massa di azionamento 3 (avente qui una conformazione a cornice circolare). All'interno dell'apertura passante 34 sono collocate entrambe le masse di rilevamento 15a, 15b, ed i vari elementi elastici atti ad assicurarne l'accoppiamento ed inoltre il supporto meccanico tramite l'aggancio alla massa di azionamento 3.

In maggiore dettaglio, a ciascuna massa di rilevamento 15a, 15b è associato un rispettivo elemento elastico di accoppiamento 32a, 32b, che si diparte ad esempio da un suo

lato maggiore da parte opposta rispetto agli elementi elastici di supporto 18 verso il centro 0 (essendo qui presente un solo elemento elastico di supporto 18 per ogni massa di rilevamento). Gli elementi elastici di accoppiamento 32a, 32b sono tra loro collegati tramite un corpo di collegamento 35, disposto in posizione centrale, ad esempio in corrispondenza del centro 0; il corpo di collegamento 35 è configurato in modo da avere peso e dimensioni sostanzialmente trascurabili, in particolar modo se confrontati con quelli delle stesse masse di rilevamento e degli elementi elastici. Come mostrato nella rappresentazione schematica di figura 6, il corpo di collegamento 35, oltre ad essere collegato alle suddette masse di rilevamento 15a, 15b, risulta collegato alla massa di azionamento 3 tramite ulteriori elementi elastici di supporto 36. Tali ulteriori elementi elastici di supporto 36, ad esempio costituiti da molle del tipo ripiegato (folded), si estendono ad esempio trasversalmente alla direzione radiale di allineamento delle masse di rilevamento 15a, 15b (coincidente inoltre con la direzione di estensione degli elementi elastici di accoppiamento 32a, 32b) in corrispondenza del centro 0. In particolare, gli ulteriori elementi elastici di supporto 36 svolgono la funzione di vincolare ulteriormente la struttura di rilevamento alla massa di azionamento 3, per incrementare

la rigidezza alla traslazione lungo l'asse verticale z delle masse di rilevamento 15a, 15d.

In tal caso, sono inoltre disposti in maniera differente gli elementi elastici di ancoraggio della massa di azionamento 3 all'interno dello spazio vuoto 6'; ad esempio, sono previsti quattro ancoraggi 7a', estendentisi a coppie da parte opposta degli ulteriori elementi elastici di supporto 36, a cui la massa di azionamento 3 è collegata mediante rispettivi elementi elastici di ancoraggio 8a', estendentisi radialmente, in maniera convergente verso il centro O.

Gli elementi elastici di accoppiamento 32a, 32b svolgono, in uso, la funzione di accoppiare i movimenti di vibrazione delle masse di rilevamento 15a, 15b, dando origine a due differenti modi di vibrare separati della struttura di rilevamento meccanica risultante. In particolare, si generano un primo modo di vibrare, in fase, ed un secondo modo di vibrare, in controfase, aventi frequenze di risonanza nettamente separate tra loro; in entrambi i casi, le due masse di rilevamento 15a, 15b vibrano alla stessa frequenza. Risulta pertanto agevole, tramite l'elettronica di lettura (qui opportunamente modificata), reiettare il modo di vibrare in fase legato alle accelerazioni di disturbo, e conservare, per le successive elaborazioni, il solo modo di vibrare in

controfase rappresentativo delle accelerazioni angolari da rilevare. In particolare, la relazione dei disturbi è principalmente legata ad una lettura di tipo differenziale, in cui il modo di vibrare in fase non produce una variazione capacitiva significativa per l'elettronica di lettura.

Le figure 7a e 7b mostrano i risultati di un'elaborazione numerica analoga a quella precedentemente descritta per la struttura di tipo noto di figura 1, mettendo direttamente a confronto i valori ottenuti con il giroscopio 30 di figura 5 (in linea continua) con i valori ottenuti con tale struttura di tipo noto (in tratteggio).

È immediato verificare come l'accoppiamento dei modi di vibrare delle masse di rilevamento 15a, 15b generi in uscita (dopo opportuna demodulazione relativamente alla frequenza di azionamento) due contributi di rumore a frequenze tra loro nettamente separate: uno, relativo alla vibrazione in fase, avendo frequenza circa doppia dell'altro, relativo alla vibrazione in controfase. In particolare, le frequenze dei due contributi di rumore sono il risultato di una differenza tra la relativa frequenza di risonanza (in fase o in controfase) e la frequenza di azionamento.

Inoltre, è immediato verificare come il suddetto accoppiamento consenta di ridurre la risposta in uscita del

giroscopio 30 ad un'accelerazione lineare esterna (ad esempio un'accelerazione di rumore) di circa 100 volte rispetto ad una soluzione tradizionale.

Come mostrato nelle figure 8a e 8b, il sistema meccanico presenta un unico picco, legato al modo di vibrare in controfase, contrariamente al doppio picco in frequenza caratteristico delle soluzioni di tipo noto.

Risulta quindi evidente come la forma di realizzazione descritta consenta di migliorare notevolmente la reiezione ai disturbi di accelerazione lineari nel piano xy del sensore. In particolare, le frequenze dei due modi di vibrare rimangono sostanzialmente inalterate in presenza di spread di processo, ed inoltre la lettura di tipo differenziale consente di eliminare in modo agevole il contributo indesiderato del modo di vibrare in fase.

Dal punto di vista meccanico, i suddetti due differenti modi di vibrare derivano dalle differenti modalità di spostamento delle masse di rilevamento 15a, 15b, durante il movimento in fase o in controfase. In particolare, durante il movimento in controfase, lo spostamento delle masse di rilevamento 15a, 15b è originato dalla deformazione sia degli elementi elastici di accoppiamento 32a, 32b che degli elementi elastici di supporto 18, così che il corpo di collegamento 35 rimane sostanzialmente immobile in posizione centrale. Durante il

movimento in fase, gli elementi elastici di accoppiamento 32a, 32b subiscono una deformazione minore rispetto al moto in controfase, si deformano inoltre gli elementi elastici di supporto 36 (che nel moto in controfase risultavano sostanzialmente fermi), ed il corpo di collegamento 35 si sposta lungo la direzione radiale.

La presente richiedente ha tuttavia verificato che il giroscopio 30, pur consentendo vantaggiosamente di reiettare accelerazioni lineari di disturbo, non è del tutto esente da problemi dovuti alla presenza dell'accelerazione centrifuga. La rotazione della massa di azionamento 3 genera infatti sulle masse di rilevamento 15a, 15b un'accelerazione centrifuga agente in versi opposti rispetto alla direzione radiale di rilevamento, e genera quindi una loro vibrazione in controfase (in maniera analoga agli effetti della forza di Coriolis legata all'accelerazione angolare di imbardata che deve essere rilevata). Come descritto in dettaglio nella suddetta domanda di brevetto europea a nome della stessa richiedente, si può dimostrare che l'accelerazione centrifuga provoca un contributo di vibrazione ad una frequenza doppia rispetto all'accelerazione da rilevare, per cui è idealmente possibile filtrarne il contributo. Tuttavia, la presente richiedente ha verificato che in determinate condizioni operative tale accelerazione

centrifuga, nonostante la presenza di un adeguato stadio di filtraggio, può provocare una saturazione degli stadi di amplificazione nell'elettronica di lettura, e quindi causare comunque errori nel rilevamento delle accelerazioni angolari.

Per risolvere tale problema, un'ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione prevede di compensare automaticamente, tramite una opportuna configurazione geometrica della struttura di rilevamento, gli effetti dell'accelerazione centrifuga (realizzando cioè un'intrinseca compensazione meccanica, in alternativa, o in aggiunta, ad una compensazione effettuata a livello dell'elettronica di lettura).

Come mostrato in figura 9, una seconda forma di realizzazione del giroscopio, qui indicato con 30', differisce da quanto descritto precedentemente sostanzialmente per una differente conformazione degli elettrodi mobili e fissi, qui indicati con 20' e, rispettivamente, 22a', 22b', e, nel caso illustrato, delle masse di rilevamento, qui indicate con 15a', 15b'.

In particolare, tale seconda forma di realizzazione prevede di sagomare in maniera opportuna gli elettrodi mobili 20' ed almeno uno tra il rispettivo primo o secondo elettrodo fisso 22a', 22b', in modo tale da generare, durante il moto di azionamento rotatorio, una variazione

capacitiva dei condensatori di rilevamento tale da compensare una loro variazione capacitiva dovuta alla presenza dell'accelerazione centrifuga.

In dettaglio, le masse di rilevamento 15a', 15b' presentano in questo caso una conformazione genericamente trapezoidale e definiscono al loro interno una finestra 40, in cui sono disposti gli elettrodi mobili 20' ed i corrispondenti elettrodi fissi 22a' (radialmente più interni) e 22b' (radialmente più esterni). La finestra 40 ha, nel piano del sensore xy, una conformazione a settore di anello circolare, e gli elettrodi mobili 20' e fissi 22a', 22b' hanno una conformazione sostanzialmente ad arco. Gli elettrodi mobili 20' si estendono all'interno della finestra 40, a partire da lati obliqui della rispettiva massa di rilevamento 15a', 15b'; i primi e secondi elettrodi fissi 22a', 22b' associati a ciascun elettrodo mobile 20' sono disposti ad esso affacciati da parti opposte, e sono ancorati al substrato 2a tramite rispettivi ancoraggi 42 (si veda la figura 10), anch'essi situati all'interno della finestra 40. In particolare, sono presenti due gruppi di elettrodi mobili 20' e corrispondenti primi e secondi elettrodi fissi 22a', 22b', ciascuno disposto in una rispettiva metà in cui la suddetta finestra 40 è suddivisa dalla direzione radiale di rilevamento.

In maggior dettaglio, come illustrato negli ingrandimenti successivi delle figure 10 e 11a, 11b, ciascun elettrodo mobile 20' presenta una prima superficie laterale (in particolare la superficie di affaccio verso il rispettivo primo elettrodo fisso 22a', o, in maniera equivalente, la superficie laterale radialmente più interna rispetto al centro O) sagomata, ed una seconda superficie laterale (in particolare la superficie di affaccio verso il rispettivo secondo elettrodo fisso 22b', o, in maniera equivalente, la superficie laterale radialmente più esterna rispetto al centro O) non sagomata. In particolare, la seconda superficie laterale non sagomata corrisponde ad un arco di circonferenza, mentre la prima superficie laterale sagomata presenta un profilo ondulatorio sostanzialmente sinusoidale (come evidenziato dalla vista dall'alto nelle suddette figure 10, 11a e 11b).

Inoltre, mentre il secondo elettrodo fisso 22b' (radialmente più esterno) ha entrambe le superfici laterali non sagomate, il primo elettrodo fisso 22a' (radialmente più interno) ha entrambe le superfici laterali sagomate, in particolare aventi uno stesso profilo sinusoidale, sostanzialmente corrispondente al profilo sinusoidale della prima superficie laterale dell'elettrodo mobile 20'.

In uso, l'accelerazione centrifuga agente su ciascuna massa mobile 15a', 15b', provoca (come mostrato dalle

frecce) un avvicinamento indesiderato (in quanto non legato al movimento di rilevamento di un'accelerazione angolare) di ciascun elettrodo mobile 20' verso il relativo secondo elettrodo fisso 22b', ed un corrispondente allontanamento dello stesso elettrodo mobile 20' dal relativo primo elettrodo fisso 22a', con una conseguente diminuzione del primo condensatore di rilevamento  $C_1$ , ed un aumento del secondo condensatore di rilevamento  $C_2$  (tale aumento essendo maggiore, in modo noto, della suddetta diminuzione, data la non linearità dell'andamento della capacità rispetto alla distanza tra gli elettrodi). Tuttavia, il movimento di rotazione della massa di azionamento 3 provoca inoltre uno spostamento circonferenziale dello stesso elettrodo mobile 20' rispetto agli elettrodi fissi 22a', 22b' (come mostrato dalle frecce). Data la sagomatura delle superfici laterali degli elettrodi che ne costituiscono le armature, tale spostamento circonferenziale a sua volta provoca una variazione capacitiva complessiva del primo condensatore di rilevamento  $C_1$  (in particolare un suo incremento capacitivo dovuto ad un avvicinamento netto tra le armature), tale da eguagliare e compensare le variazioni del secondo condensatore di rilevamento  $C_2$  dovute al contributo dell'accelerazione centrifuga. Inoltre, il contributo in frequenza della variazione capacitiva dovuta alla sagomatura degli elettrodi corrisponde sostanzialmente

al contributo in frequenza dovuto all'accelerazione centrifuga (come precedentemente indicato, avente frequenza doppia rispetto alla frequenza di rilevamento), in modo tale da consentire una effettiva compensazione delle risultanti variazioni capacitive. In altre parole, tramite la suddetta sagomatura è possibile ottenere una differenza capacitiva tra i condensatori di rilevamento (differenza che viene elaborata dall'elettronica di lettura) che rimane sostanzialmente costante in assenza di un'accelerazione di Coriolis, e quindi di un'accelerazione angolare da rilevare.

Vantaggiosamente, anche grazie al fatto che il valore di capacità del secondo condensatore di rilevamento  $C_2$  non è influenzato dallo spostamento circonferenziale dell'elettrodo mobile 20' dovuto al moto di azionamento rotatorio, risulta agevole, tramite un opportuno modello matematico ed opportuni algoritmi di calcolo, determinare i parametri della sagomatura (in particolare del profilo sinusoidale, quali ampiezza o periodo) tali da ottenere una minimizzazione della differenza capacitiva  $\Delta C$  tra i condensatori di rilevamento  $C_1$ ,  $C_2$  dovuta all'accelerazione centrifuga. Viene ad esempio utilizzato a tal fine un algoritmo di integrazione numerica delle variazioni capacitive su tutta la superficie degli elettrodi (algoritmo di per sé noto e per questo non descritto in

dettaglio), con l'obiettivo di determinare i parametri della forma geometrica degli elettrodi tali da minimizzare la differenza capacitiva  $\Delta C$ .

In figura 12a è illustrata con linea continua la variazione capacitiva associata ad un elettrodo mobile 20' durante il moto di azionamento a causa della sola accelerazione centrifuga, ed inoltre è illustrata con linea tratteggiata la variazione capacitiva associata allo stesso elettrodo mobile 20' causata dalla sola sagomatura degli elettrodi precedentemente descritta. Come si può facilmente osservare, le suddette variazioni capacitive risultano sostanzialmente equivalenti; pertanto, come illustrato in figura 12b, l'errore di compensazione sulla variazione capacitiva risultante (differenza capacitiva  $\Delta C$ , data dalla differenza delle suddette variazioni capacitive) è, grazie alla compensazione meccanica intrinseca, sostanzialmente nullo o comunque trascurabile. In particolare, è possibile dimostrare che tale compensazione intrinseca permette di ridurre l'effetto di disturbo dell'accelerazione centrifuga di un fattore pari a 100.

In maniera del tutto evidente, si sottolinea che la forma sinusoidale precedentemente descritta non è la sola forma possibile per ottenere il suddetto effetto, e che risultano ugualmente possibili altre forme geometriche, i cui parametri potranno nuovamente essere determinati

tramite algoritmi numerici (ad esempio, può essere prevista una sagomatura con un profilo a dente di sega).

Un'ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione prevede di realizzare un giroscopio bi- o triassiale, aggiungendo alla struttura di rilevamento delle accelerazioni angolari di imbardata precedentemente descritta, una struttura di rilevamento di accelerazioni angolari di pitch (beccheggio) e/o di roll (rollio), sostanzialmente come descritta nelle suddette domande di brevetto a nome della stessa richiedente.

Un esempio di giroscopio triassiale così risultante è mostrato in figura 13, in cui è indicato con il numero di riferimento 30''.

In sintesi (ma si faccia riferimento alle suddette domande di brevetto per ulteriori dettagli), il giroscopio 30'' (illustrato in maniera schematica) comprende in tal caso una prima ed una seconda coppia di ulteriori masse di rilevamento 46a-46b e 46c-46d, alloggiata all'interno di rispettive aperture passanti nella massa di azionamento 3 e collegate ad essa tramite rispettivi elementi elastici 47. Le ulteriori masse di rilevamento 46a, 46b della prima coppia sono allineate lungo una prima direzione diametrale  $x_1$ , inclinata rispetto al primo asse orizzontale  $x$  del die 2 di un angolo di inclinazione  $\alpha$  (considerato in senso antiorario), il cui valore è compreso tra  $40^\circ$  e  $50^\circ$  e

preferibilmente pari a  $45^\circ$ . Analogamente, le ulteriori masse di rilevamento 46c, 46d della seconda coppia sono allineate lungo una seconda direzione diametrale  $x_2$ , sostanzialmente ortogonale alla prima direzione diametrale  $x_1$ , ed inclinata rispetto al primo asse orizzontale  $x$  dello stesso angolo di inclinazione  $\alpha$  (considerato in questo caso in senso opposto, orario). Inoltre, le ulteriori masse di rilevamento 46a, 46b della prima coppia risultano simmetriche a corrispondenti ulteriori masse di rilevamento 46d, 46c della seconda coppia, rispetto ad un asse di simmetria delle piazzole di contatto 2d (coincidente con il secondo asse orizzontale  $y$ ). Ad esempio, le ulteriori masse di rilevamento 46a-46d presentano, in pianta, una forma sostanzialmente a settore di anello radiale, e costituiscono sensori di accelerazione con asse parallelo all'asse verticale  $z$ . In uso, un'accelerazione angolare di pitch o di roll genera una forza di Coriolis sulle ulteriori masse di rilevamento 46a-46d tale da provocarne una rotazione al di fuori del piano del sensore  $xy$ , ed un avvicinamento/allontanamento a rispettivi elettrodi di rilevamento ad esse affacciati e disposti al di sopra del substrato 2a (mostrati in linea tratteggiata).

In tale figura 13 sono inoltre mostrati ulteriori ancoraggi 7b disposti esternamente alla massa di azionamento 3, tramite i quali la massa di azionamento

stessa è ancorata al substrato 2a, e ai quali essa è collegata mediante ulteriori elementi elastici di ancoraggio 8b.

La figura 14 illustra un dispositivo elettronico 50 comprendente il giroscopio microelettromeccanico 30' (o 30'') precedentemente descritto. Il dispositivo elettronico 50 può vantaggiosamente essere utilizzato in una pluralità di sistemi elettronici, ad esempio in sistemi di navigazione inerziale, in sistemi automotive o in sistemi di tipo portatile, quali ad esempio: un PDA (Personal Digital Assistant); un computer portatile; un telefono cellulare; un riproduttore di audio digitale; una foto- o video-camera; o ulteriori sistemi in grado di elaborare, memorizzare, trasmettere e ricevere segnali ed informazioni.

Il dispositivo elettronico 50 comprende inoltre un circuito di azionamento 51, operativamente accoppiato al gruppo di azionamento 4 per impartire il movimento di azionamento rotatorio alla massa di azionamento 3, e fornire segnali di polarizzazione alle strutture microelettromeccaniche (in modo di per sé noto, qui non illustrato in dettaglio); un circuito di lettura 52, operativamente accoppiato ai condensatori di rilevamento

$C_1$ ,  $C_2$  delle masse di rilevamento, per rilevare l'entità degli spostamenti delle stesse masse di rilevamento e quindi determinare le velocità angolari agenti sulla struttura; ed un'unità elettronica di controllo 54, ad esempio a microprocessore, collegata al circuito di lettura 52, ed atta a sovrintendere al funzionamento generale del dispositivo elettronico 50, ad esempio sulla base delle velocità angolari rilevate e determinate.

I vantaggi del giroscopio microelettromeccanico realizzato secondo la presente invenzione emergono in maniera evidente dalla descrizione precedente.

In particolare, si sottolinea nuovamente il fatto che l'accoppiamento meccanico tramite elementi elastici delle masse di rilevamento delle accelerazioni angolari di imbardata consente di reiettare i disturbi di accelerazione esterni (ad esempio dovute a rumore ambientale o di altra natura), anche in presenza di spread di processo.

La particolare sagomatura degli elettrodi di rilevamento consente di compensare e minimizzare gli effetti dell'accelerazione centrifuga dovuta al movimento di azionamento rotatorio; in particolare, tali effetti vengono intrinsecamente compensati senza richiedere particolari accorgimenti aggiuntivi nell'elettronica di

lettura.

Inoltre, la corrispondente struttura di rilevamento delle accelerazioni di imbardata risulta avere un'architettura del tutto compatibile con un giroscopio bi- o triassiale, consentendo infatti l'integrazione con strutture di rilevamento di accelerazioni angolari di beccheggio e/o di rollio.

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

In particolare, è evidente che possono essere previste modifiche alla configurazione di alcuni degli elementi strutturali del giroscopio. Ad esempio, le masse di rilevamento 15a', 15b' per il rilevamento delle accelerazioni angolari di imbardata possono essere allineate lungo una differente direzione nel piano del sensore xy (ad esempio lungo il primo asse orizzontale x); può essere prevista una differente conformazione degli elementi elastici di accoppiamento 32a, 32b e del corpo di collegamento 35; possono eventualmente essere sagomati sia i primi che i secondi elettrodi fissi 22a', 22b', oppure possono essere sagomati solamente i secondi elettrodi fissi

**Elena CERBARO**  
*(Iscrizione Albo nr. 426/BM)*

22b' radialmente più esterni; sia i primi che i secondi elettrodi fissi 22a', 22b' possono eventualmente estendersi all'esterno delle relative masse di rilevamento 15a', 15b', in maniera sostanzialmente analoga a quanto illustrato con riferimento alla figura 5. Più in generale, la massa di azionamento 3 può avere una forma differente, diversa da quella circolare, quale una forma genericamente poligonale chiusa, così come può essere differente la forma della cornice 2b del die 2.

Inoltre, lo spostamento delle masse di rilevamento può essere determinato con tecnica diversa da quella capacitiva, ad esempio mediante il rilevamento di una forza magnetica; ed il momento torcente per far oscillare la massa di azionamento con movimento rotatorio può essere generato in maniera differente, ad esempio mediante elettrodi "parallel-plate", oppure attuazione magnetica.

## RIVENDICAZIONI

1. Struttura integrata microelettromeccanica (30; 30'; 30''), comprendente:

- una massa di azionamento (3), ancorata ad un substrato (2a) tramite elementi elastici di ancoraggio (8a, 8b), e atta ad essere azionata in un piano (xy) con un movimento di azionamento; ed

- una prima (15a; 15a') ed una seconda (15b; 15b') massa di rilevamento, sospese all'interno di, e accoppiate a, detta massa di azionamento (3) tramite rispettivi elementi elastici di supporto (18) così da essere ad essa solidali in detto movimento di azionamento ed effettuare un rispettivo movimento di rilevamento in risposta ad una velocità angolare,

caratterizzata dal fatto che dette prima (15a; 15a') e seconda (15b; 15b') massa di rilevamento sono tra loro collegate tramite elementi elastici di accoppiamento (32a, 32b), configurati in modo da accoppiarne i modi di vibrazione.

2. Struttura secondo la rivendicazione 1, in cui detta massa di azionamento (3) è azionata con un movimento rotatorio in detto piano (xy), e dette prima (15a; 15a') e seconda (15b; 15b') massa di rilevamento sono atte ad effettuare un rispettivo movimento di rilevamento lineare in detto piano (xy) in risposta a detta velocità angolare;

**Elena CERBARO**  
*(Iscrizione Albo nr. 426/BM)*

i movimenti di rilevamento di dette prima (15a; 15a') e seconda (15b; 15b') massa di rilevamento essendo tra loro in controfase ed essendo effettuati in direzione radiale.

3. Struttura secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui a ciascuna di dette prima (15a; 15a') e seconda (15b; 15b') massa di rilevamento è associato un rispettivo elemento elastico di accoppiamento (32a, 32b), e gli elementi elastici di accoppiamento (32a, 32b) di dette prima (15a; 15a') e seconda (15b; 15b') massa di rilevamento sono tra loro collegati tramite l'interposizione di un corpo di collegamento (35) avente massa sostanzialmente trascurabile.

4. Struttura secondo la rivendicazione 3, comprendente inoltre ulteriori elementi elastici di supporto (36), collegati tra detto corpo di collegamento (35) e detta massa di azionamento (3).

5. Struttura secondo la rivendicazione 3 o 4, in cui detta massa di azionamento (3) definisce internamente un'apertura passante (34) all'interno della quale sono disposti dette prima (15a; 15a') e seconda (15b; 15b') massa di rilevamento, detti elementi elastici di accoppiamento (32a, 32b), detti ulteriori elementi elastici di supporto (36) e detto corpo di collegamento (15).

6. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detti elementi elastici

di accoppiamento (32a, 32b) sono configurati in modo tale che l'insieme di dette prima (15a; 15a') e seconda (15b; 15b') massa di rilevamento presenti due modi di vibrare, uno in fase e l'altro in controfase, aventi frequenze tra loro distinte.

7. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detta massa di azionamento (3) è azionata con un movimento rotatorio in detto piano (xy), ed a ciascuna di dette prima (15a; 15a') e seconda (15b; 15b') massa di rilevamento sono collegati solidalmente elettrodi mobili (20'), a cui sono affacciati elettrodi fissi (22a', 22b') per formare condensatori di rilevamento ( $C_1$ ,  $C_2$ ); ed in cui almeno una superficie di affaccio reciproco di detti elettrodi mobili (20') e di detti elettrodi fissi (22a', 22b') presenta un profilo sagomato.

8. Struttura secondo la rivendicazione 7, in cui detto profilo sagomato è configurato in modo tale da generare, per il movimento di una rispettiva di dette prima (15a; 15a') e seconda (15b; 15b') massa di rilevamento solidale a detto movimento di azionamento, una variazione capacitiva associata a detti condensatori di rilevamento ( $C_1$ ,  $C_2$ ), di valore tale da compensare una variazione capacitiva associata agli stessi condensatori di rilevamento ( $C_1$ ,  $C_2$ ) per un movimento di detta rispettiva di dette prima (15a;

15a') e seconda (15b; 15b') massa di rilevamento dovuto ad un'accelerazione centrifuga derivante da detto movimento di azionamento.

9. Struttura secondo la rivendicazione 7 o 8, in cui a ciascuno di detti elettrodi mobili (20') sono affacciati, da parti opposte rispetto ad una direzione radiale di detto movimento di rilevamento, un primo (22a') ed un secondo (22b') elettrodo fisso; una superficie di reciproco affaccio di ciascuno di detti elettrodi mobili (20') e di almeno uno tra detti primo e secondo elettrodo fisso (22a', 22b') essendo provvista di detto profilo sagomato.

10. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 7-9, in cui detto profilo sagomato è un profilo sostanzialmente sinusoidale.

11. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 7-10, in cui ciascuna di dette prima (15a; 15a') e seconda (15b; 15b') massa di rilevamento definisce internamente una finestra (40) all'interno della quale sono disposti detti elettrodi mobili (20') e detti elettrodi fissi (22a', 22b'); detti elettrodi mobili (20') estendendosi a partire da pareti interne di dette prima (15a; 15a') e seconda (15b; 15b') massa di rilevamento.

12. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detta velocità angolare è una velocità angolare di imbardata, applicata in uso

intorno ad un asse verticale (z) trasversale a detto piano (xy).

13. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre una prima (46a, 46b) ed una seconda (46c, 46d) coppia di ulteriori masse di rilevamento, sospese all'interno di, e accoppiate a, detta massa di azionamento (3) tramite rispettivi elementi elastici (47) così da essere ad essa solidali in detto movimento di azionamento ed effettuare un movimento di rilevamento di rotazione al di fuori di detto piano (xy) in risposta ad una prima e ad una seconda ulteriore velocità angolare agenti rispettivamente intorno ad un primo e ad un secondo asse orizzontale (x, y) tra loro ortogonali ed appartenenti a detto piano (xy); le ulteriori masse di rilevamento di detta prima coppia (46a, 46b) e le ulteriori masse di rilevamento di detta seconda coppia (46c, 46d) essendo allineate lungo rispettive direzioni ( $x_1$ ,  $x_2$ ), aventi inclinazioni non nulle e di segno opposto rispetto a detto asse orizzontale (x, y).

14. Dispositivo elettronico (50) comprendente una struttura integrata microelettromeccanica (30; 30'; 30'') secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, ed inoltre uno stadio di lettura (52), operativamente accoppiato a detta struttura integrata microelettromeccanica.

15. Dispositivo secondo la rivendicazione 14, in cui detti elementi elastici di accoppiamento (32a, 32b) sono configurati in modo tale che l'insieme di dette prima (15a; 15a') e seconda (15b; 15b') massa di rilevamento presenti due modi di vibrare, uno in fase e l'altro in controfase, aventi frequenze tra loro distinte; ed in cui detto stadio di lettura (52) è configurato in modo da eliminare un contributo di detto modo di vibrare in fase.

16. Dispositivo secondo la rivendicazione 14 o 15, in cui a ciascuno di detti elettrodi mobili (20') sono affacciati, da parti opposte rispetto ad una direzione radiale di detto movimento di rilevamento, un primo (22a') ed un secondo (22b') elettrodo fisso, in modo da formare un primo ( $C_1$ ) ed un secondo ( $C_2$ ) condensatore di rilevamento; in cui detto stadio di lettura (52) è configurato in modo da elaborare una differenza capacitiva ( $\Delta C$ ) tra detti primo e secondo condensatore di rilevamento ( $C_1, C_2$ ).

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

**Elena CERBARO**

CLAIMS

1. An integrated microelectromechanical structure (30; 30'; 30''), comprising:

- a driving mass (3), anchored to a substrate (2a) via elastic anchorage elements (8a, 8b) and designed to be actuated in a plane (xy) with a driving movement; and

- a first sensing mass (15a; 15a') and a second sensing mass (15b; 15b'), suspended within said driving mass (3) and coupled thereto via respective elastic supporting elements (18), so as to be fixed to said driving mass in said driving movement and to perform a respective detection movement in response to an angular velocity,

characterized in that said first (15a; 15a') and second (15b; 15b') sensing masses are connected together via elastic coupling elements (32a, 32b) that are configured so as to couple their modes of vibration.

2. The structure according to claim 1, wherein said driving mass (3) is actuated with a rotary movement in said plane (xy), and said first (15a; 15a') and second (15b; 15b') sensing masses are designed to perform a respective linear detection movement in said plane (xy) in response to said angular velocity; the detection movements of said first (15a; 15a') and second (15b; 15b') sensing masses being in phase opposition with respect to one another and performed in a radial direction.

3. The structure according to claim 1 or 2, wherein a respective elastic coupling element (32a, 32b) is associated to each of said first (15a; 15a') and second (15b; 15b') sensing mass, and the elastic coupling elements (32a, 32b) of said first (15a; 15a') and second (15b; 15b') sensing masses are connected together via the interposition of a connection body (35) having a substantially negligible mass.

4. The structure according to claim 3, comprising further elastic supporting elements (36), connected between said connection body (35) and said driving mass (3).

5. The structure according to claim 3 or 4, wherein said driving mass (3) defines within it a through opening (34); said first (15a; 15a') and second (15b; 15b') sensing masses, said elastic coupling elements (32a, 32b), said further elastic supporting elements (36) and said connection body (15) being arranged within said through opening (34).

6. The structure according to any one of the preceding claims, wherein said elastic coupling elements (32a, 32b) are configured in such a way that the group of said first sensing mass (15a; 15a') and second sensing mass (15b; 15b') has two vibration modes, one in phase and the other in phase opposition, having frequencies that are distinct from one another.

7. The structure according to any one of the preceding claims, wherein said driving mass (3) is actuated with a rotary movement in said plane (xy) and mobile electrodes (20') are fixedly connected to each of said first (15a; 15a') and second (15b; 15b') sensing mass, fixed electrodes (22a', 22b') facing said mobile electrodes (20') for forming sensing capacitors ( $C_1$ ,  $C_2$ ); and wherein at least one mutual facing surface of said mobile electrodes (20') and of said fixed electrodes (22a', 22b') has a profile shaped according to a pattern.

8. The structure according to claim 7, wherein said shaped profile is configured in such a way as to generate, on account of the movement of a respective one of said first (15a; 15a') and second (15b; 15b') sensing masses fixed with respect to said driving movement, a capacitive variation associated to said sensing capacitors ( $C_1$ ,  $C_2$ ), of a value such as to compensate for a capacitive variation associated to said sensing capacitors ( $C_1$ ,  $C_2$ ) on account of a movement of said respective one of said first (15a; 15a') and second (15b; 15b') sensing masses due to a centrifugal acceleration deriving from said driving movement.

9. The structure according to claim 7 or 8, wherein a first fixed electrode (22a') and a second fixed electrode (22b') face each of said mobile electrodes (20'), on opposite

sides with respect to a radial direction of said detection movement; a mutual facing surface of each one of said mobile electrodes (20') and at least one between said first (22a') and second (22b') fixed electrodes having said shaped profile.

10. The structure according to any one of claims 7-9, wherein said shaped profile is a substantially sinusoidal profile.

11. The structure according to any one of claims 7-10, wherein each one of said first (15a; 15a') and second (15b; 15b') sensing masses defines within it a window (40), set within which are said mobile electrodes (20') and said fixed electrodes (22a', 22b'); said mobile electrodes (20') extending from internal walls of said first sensing mass (15a; 15a') and second sensing mass (15b; 15b').

12. The structure according to any one of the preceding claims, wherein said angular velocity is a yaw angular velocity, applied in use about a vertical axis (z) transverse to said plane (xy).

13. The structure according to any one of the preceding claims, comprising a first pair (46a, 46b) and a second pair (46c, 46d) of further sensing masses, suspended within, and coupled to, said driving mass (3) via respective elastic elements (47) so as to be fixed with respect thereto in said driving movement and to perform a

detection movement of rotation out of said plane (xy) in response to a first further angular velocity and a second further angular velocity acting, respectively, about a first horizontal axis (x) and a second horizontal axis (y) that are mutually orthogonal and belong to said plane (xy); the further sensing masses of said first pair (46a, 46b) and the further sensing masses of said second pair (46c, 46d) being aligned in respective directions ( $x_1$ ,  $x_2$ ), having inclinations that are non zero and of opposite sign with respect to said horizontal axis (x, y).

14. An electronic device (50) comprising an integrated microelectromechanical structure (30; 30'; 30'') according to any one of the preceding claims, and a reading stage (52), operatively coupled to said integrated microelectromechanical structure.

15. The device according to claim 14, wherein said elastic coupling elements (32a, 32b) are configured in such a way that the group of said first (15a; 15a') and second (15b; 15b') sensing masses has two vibration modes, one in phase and the other in phase opposition, having frequencies that are distinct from one another; and wherein said reading stage (52) is configured so as to eliminate a contribution of said in-phase vibration mode.

16. The device according to claim 14 or 15, wherein facing each one of said mobile electrodes (20') are, on opposite

sides with respect to a radial direction of said detection movement, a first fixed electrode (22a') and a second fixed electrode (22b') so as to form a first sensing capacitor ( $C_1$ ) and a second sensing capacitor ( $C_2$ ); wherein said reading stage (52) is configured so as to process a capacitive difference ( $\Delta C$ ) between said first and second sensing capacitors ( $C_1, C_2$ ).

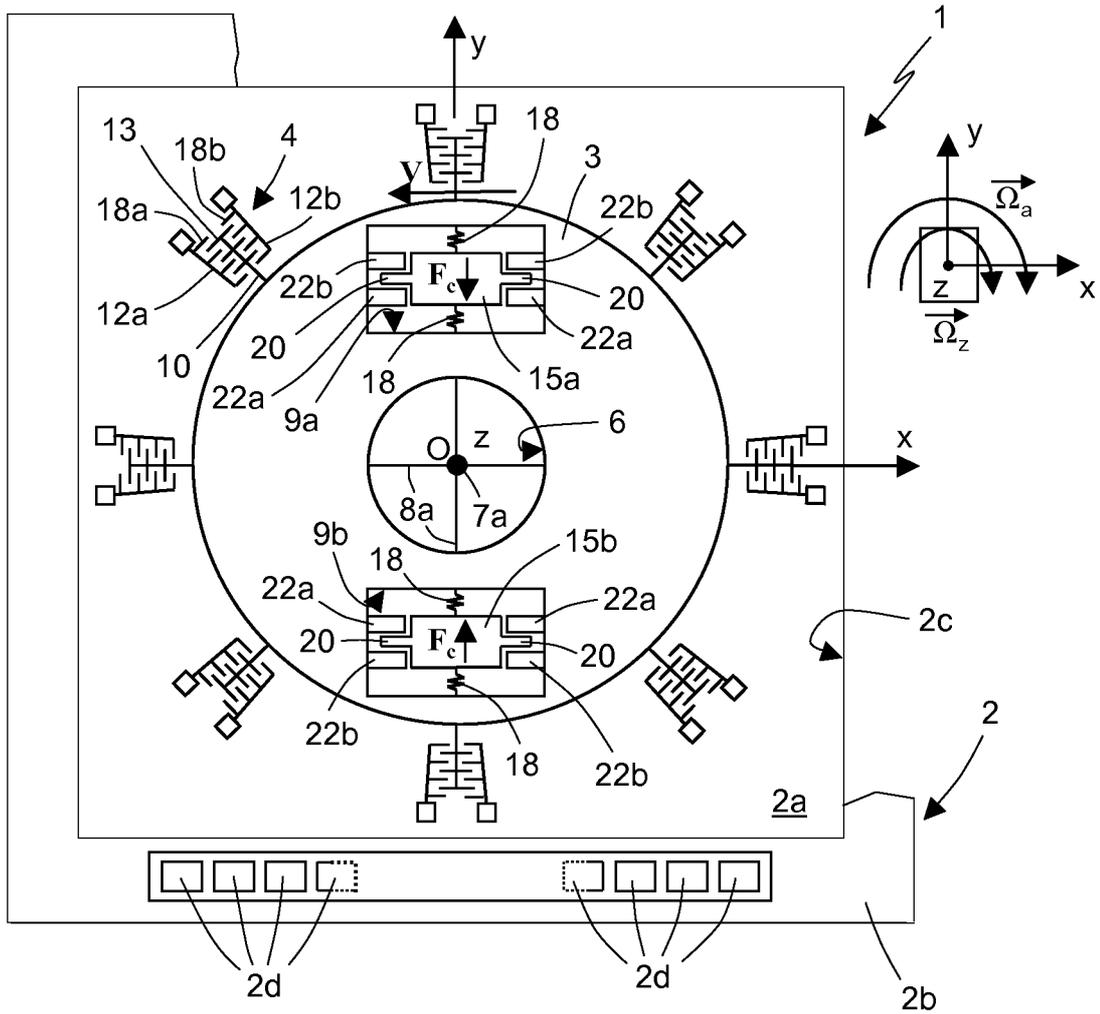


Fig.1

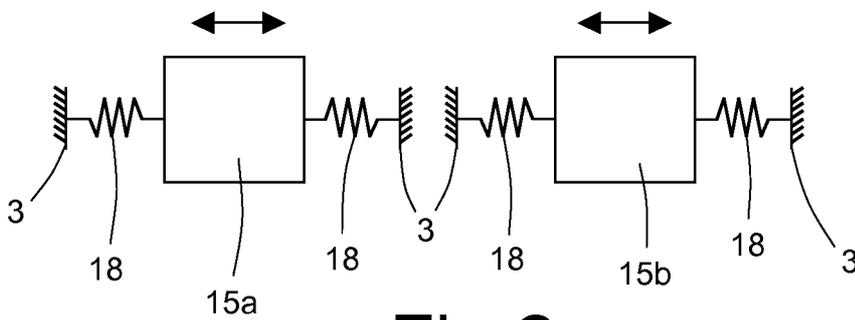


Fig.2

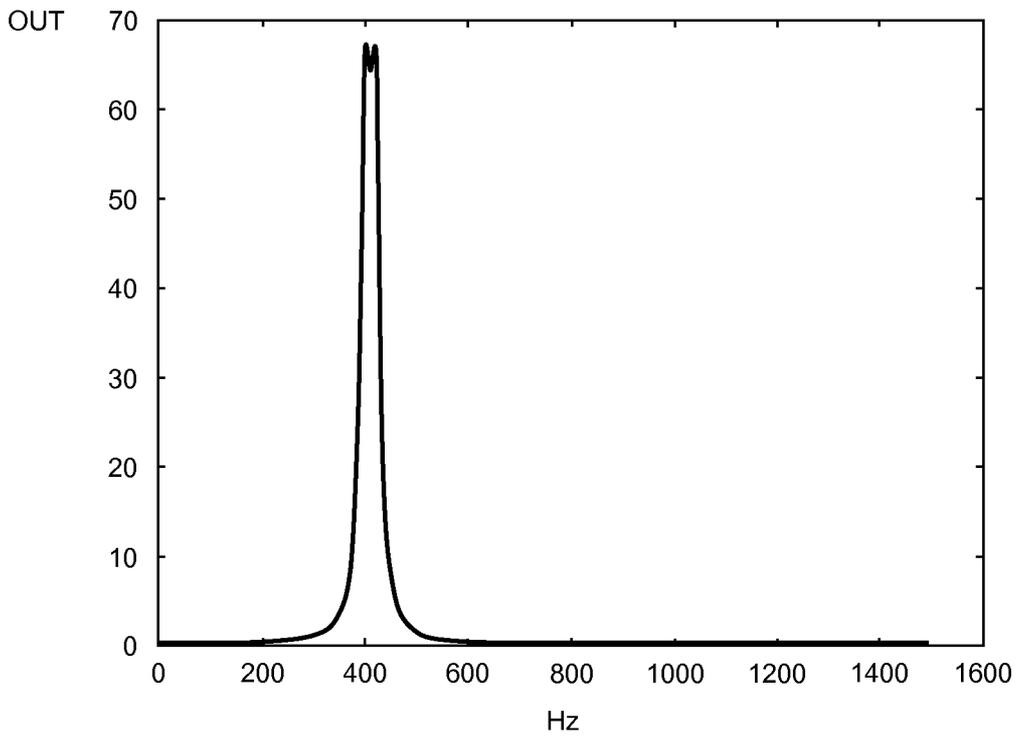


Fig.3a

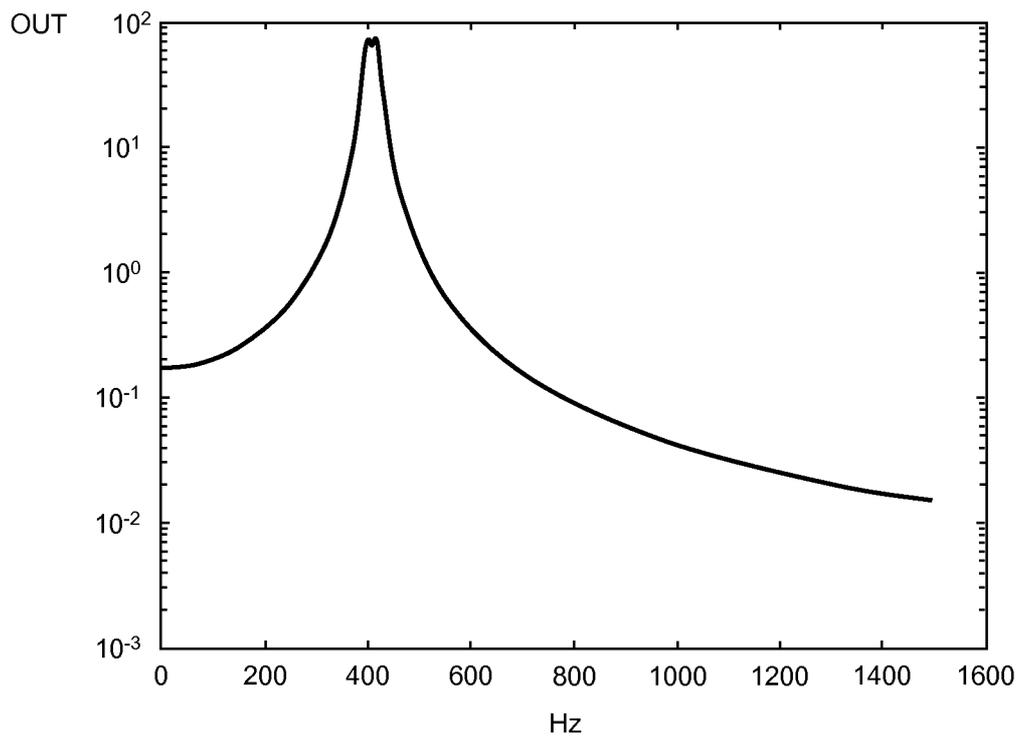


Fig.3b

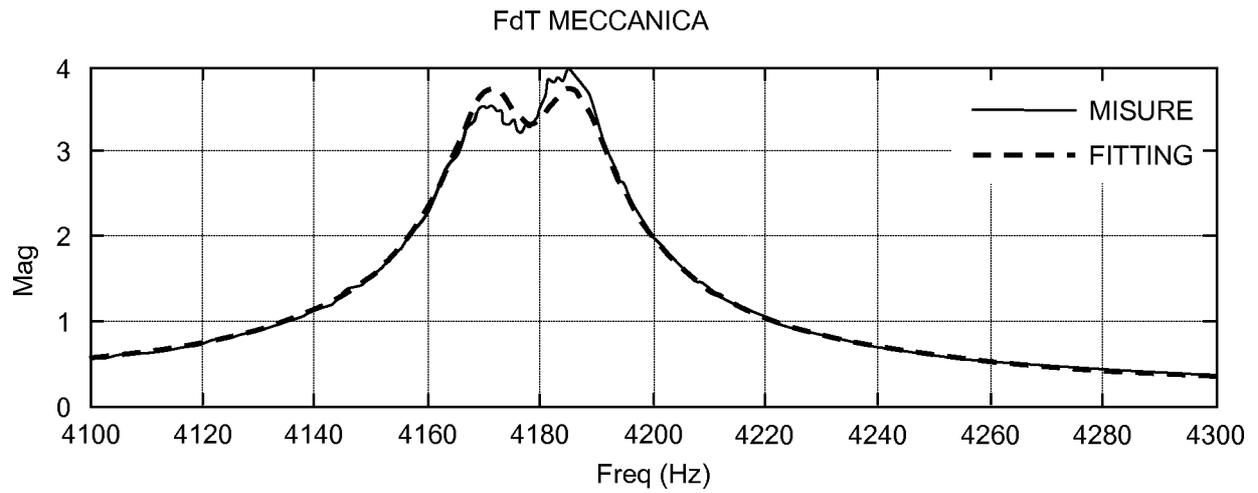


Fig.4a

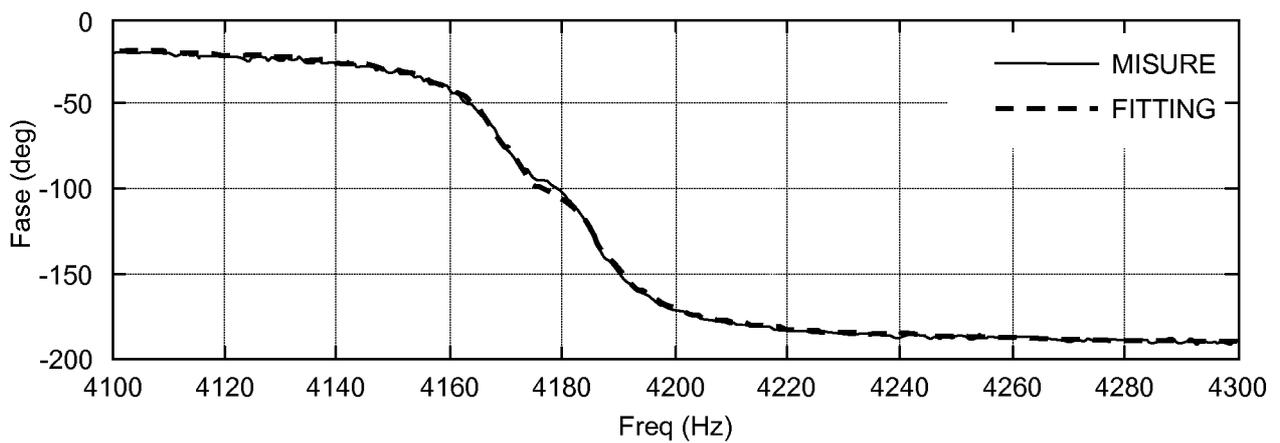


Fig.4b

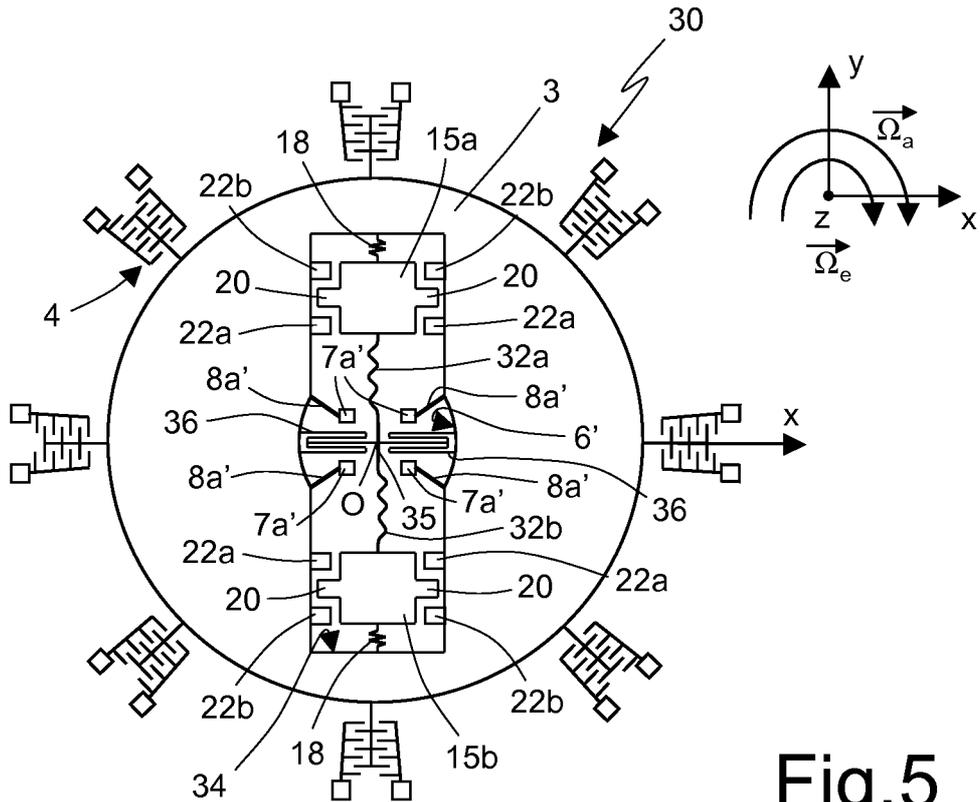


Fig.5

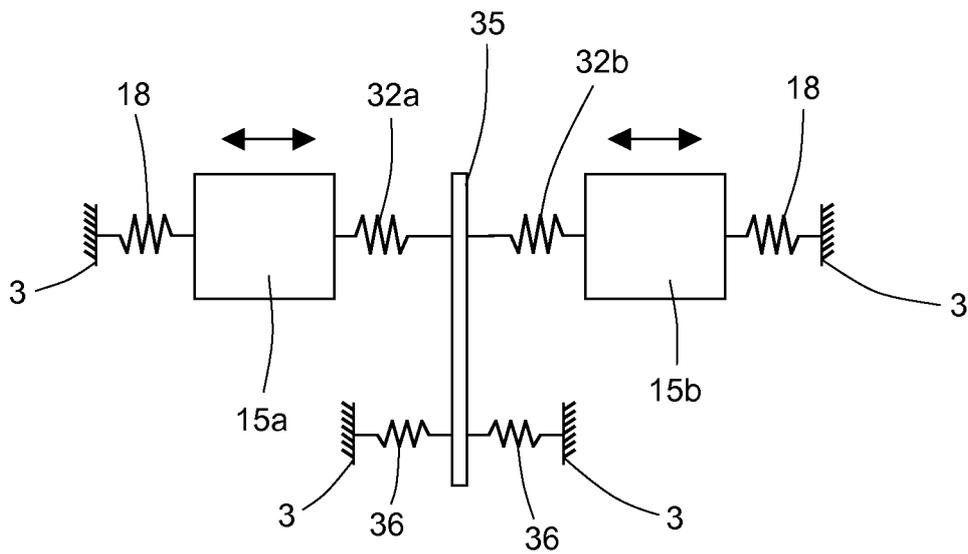


Fig.6

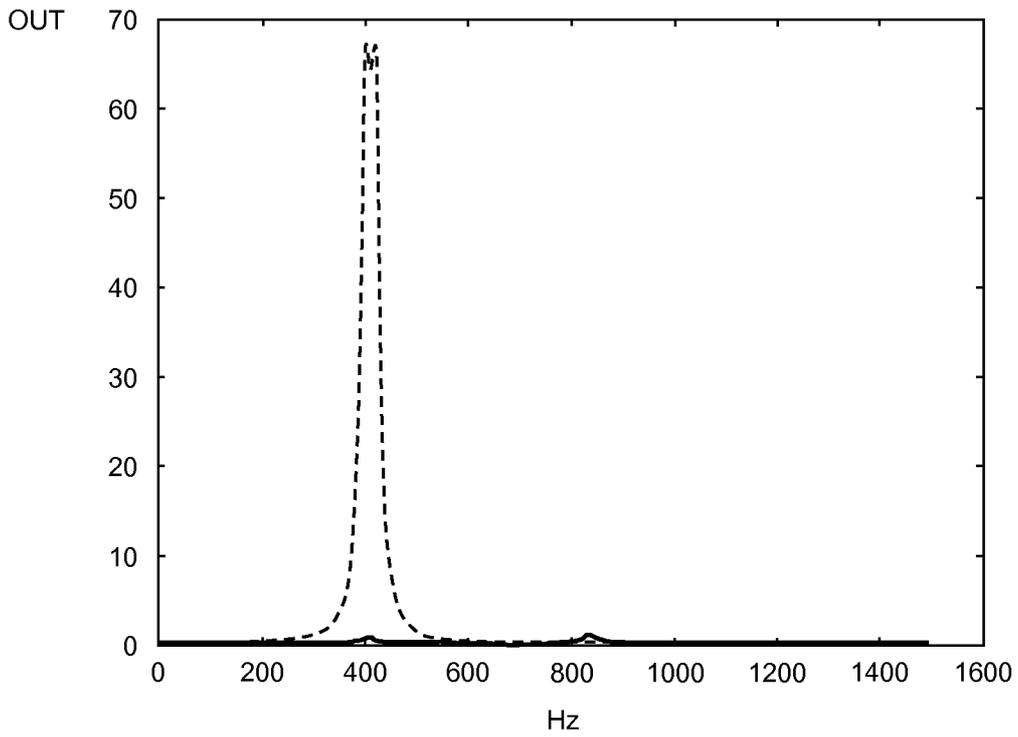


Fig.7a

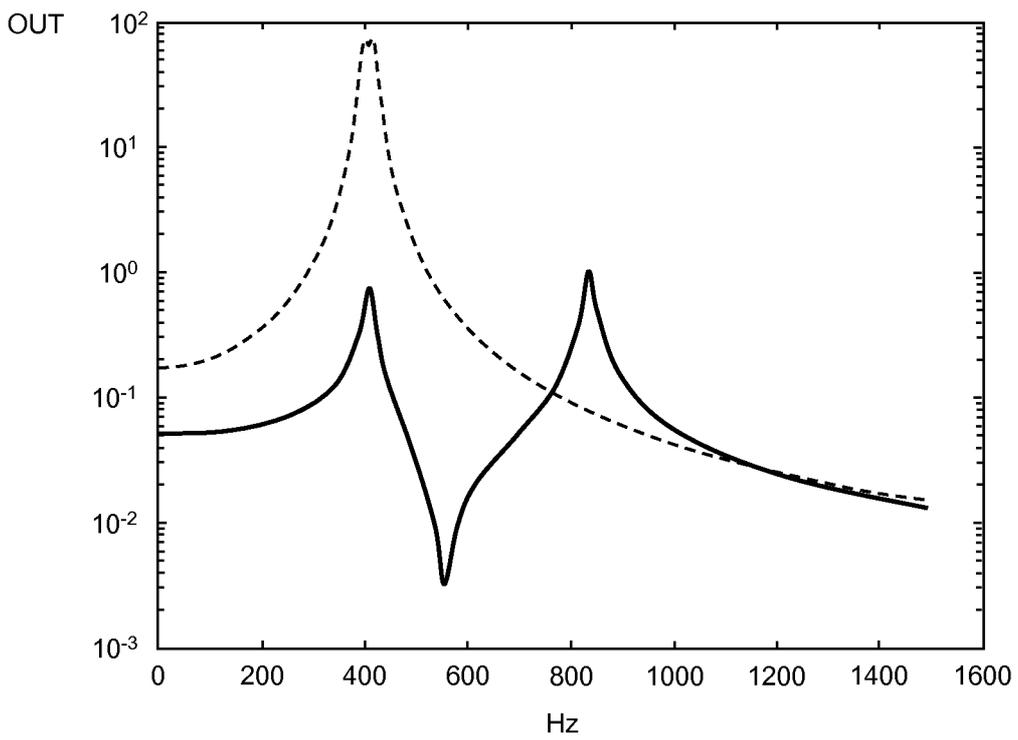


Fig.7b

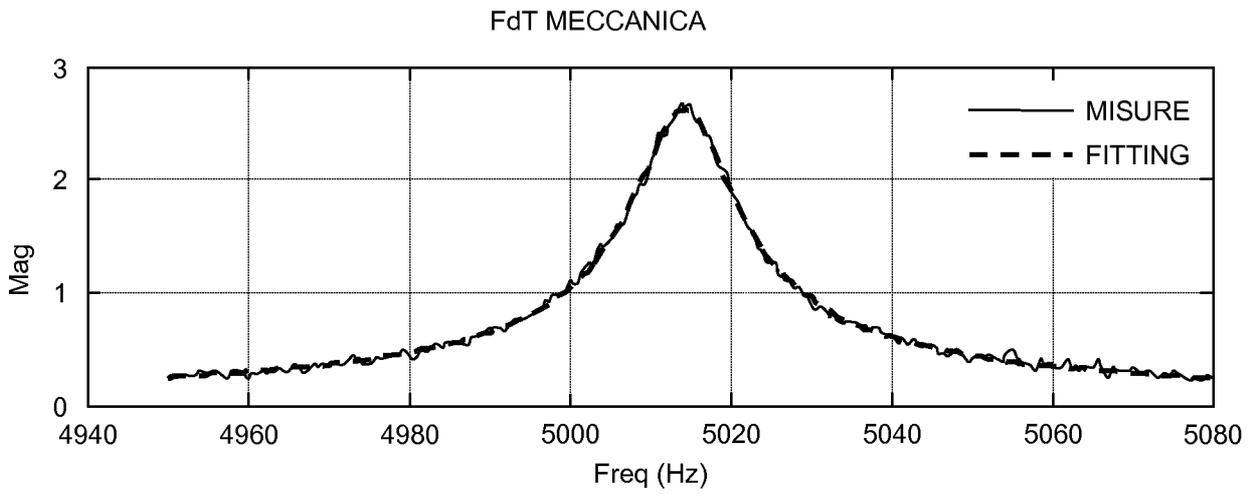


Fig.8a

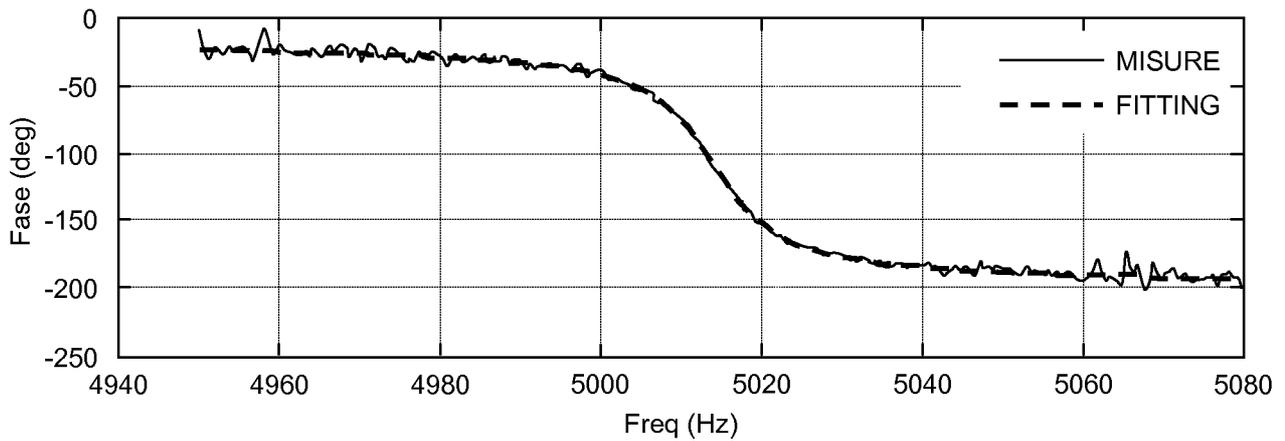


Fig.8b

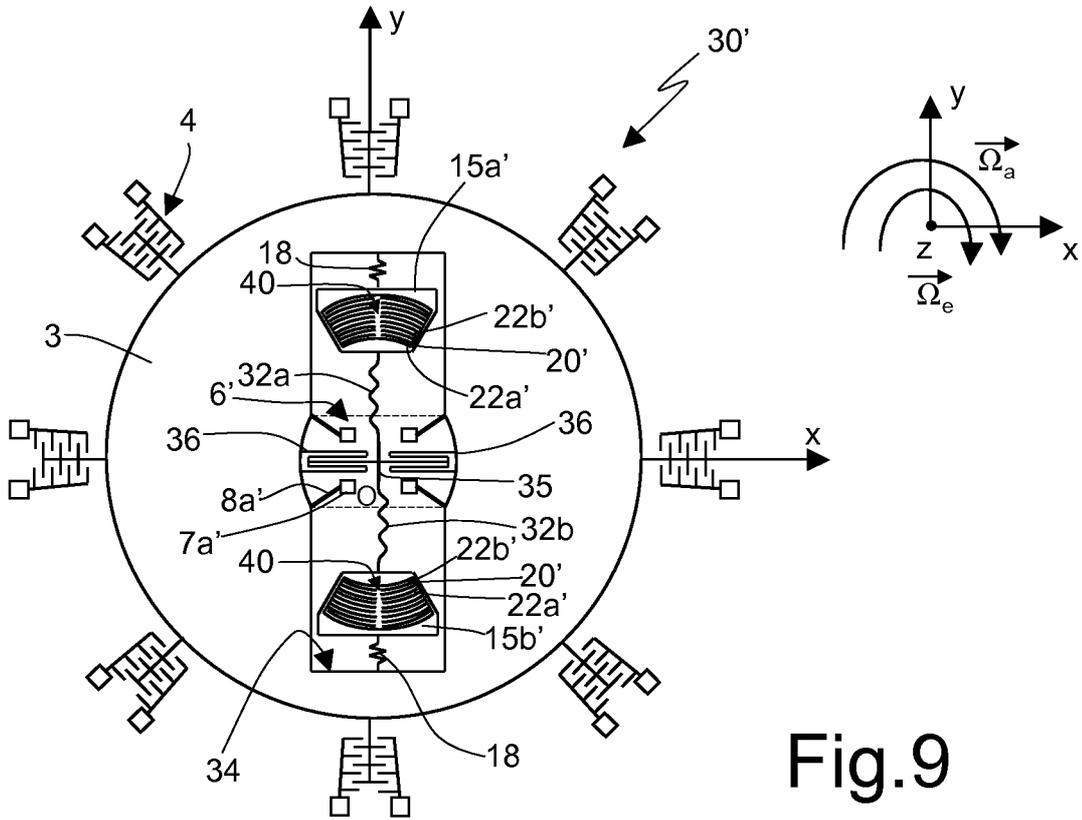


Fig.9

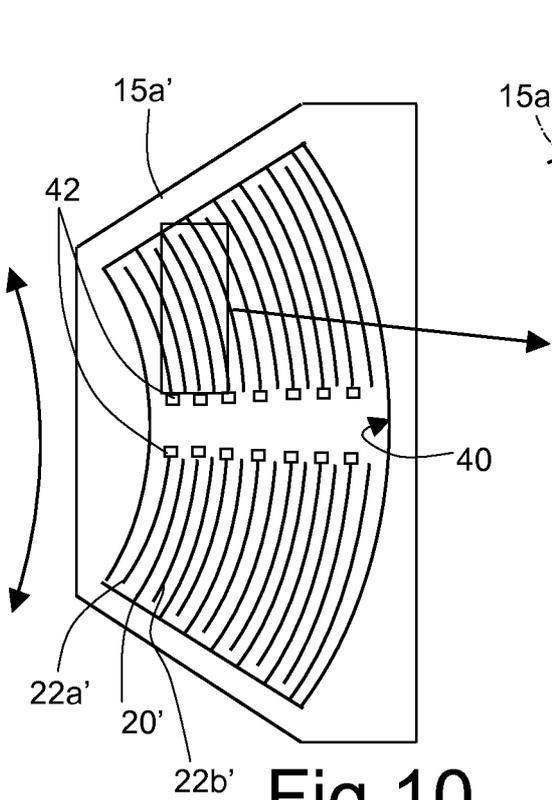


Fig.10

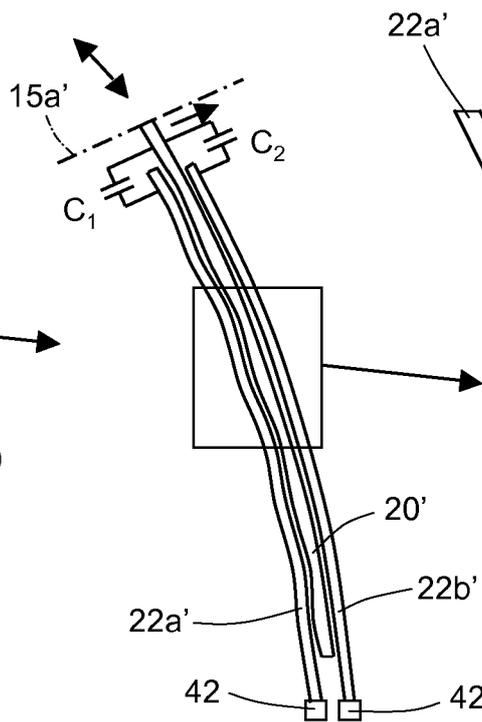


Fig.11a

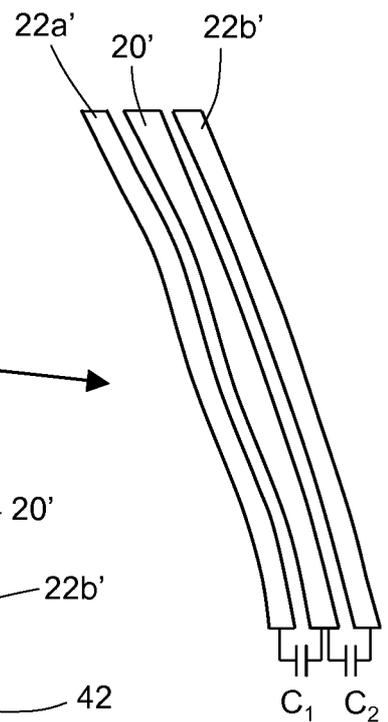


Fig.11b

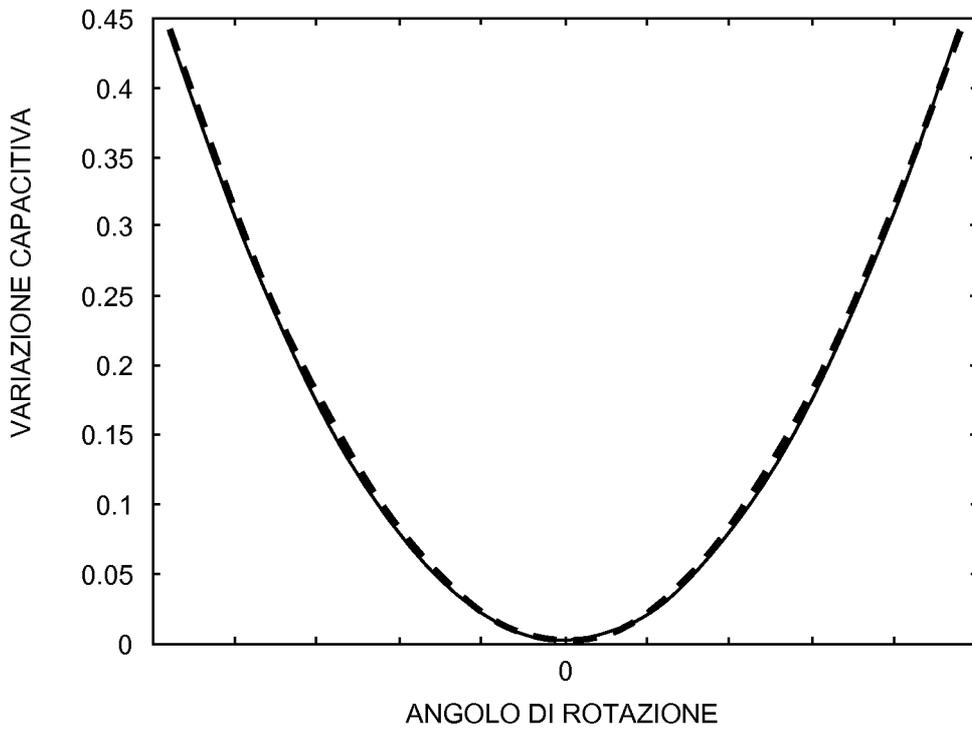


Fig.12a

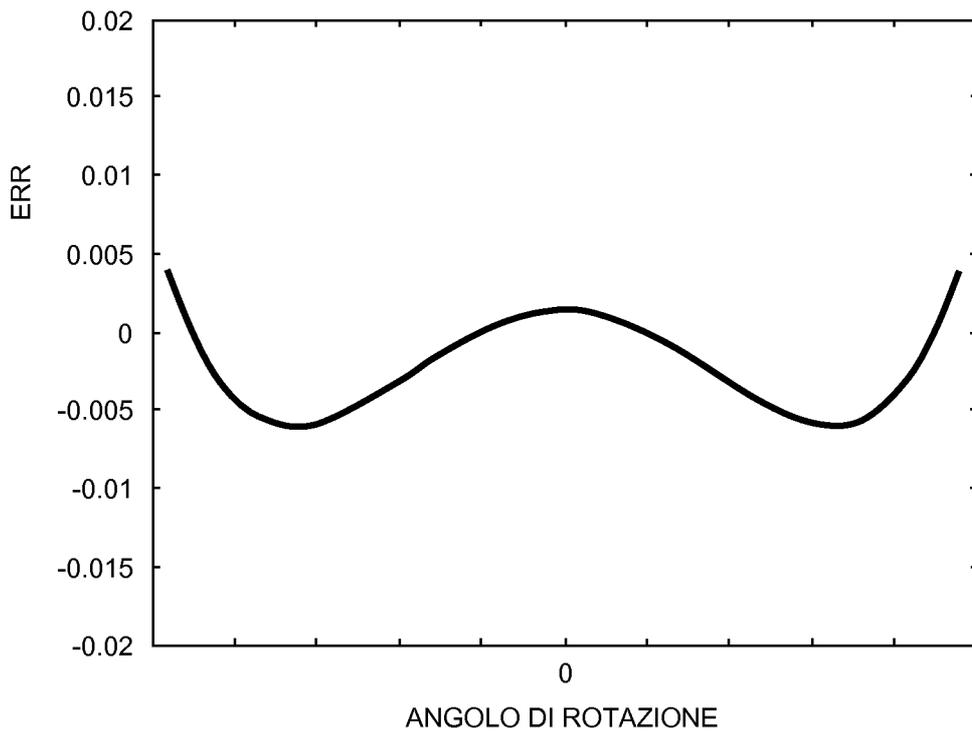


Fig.12b

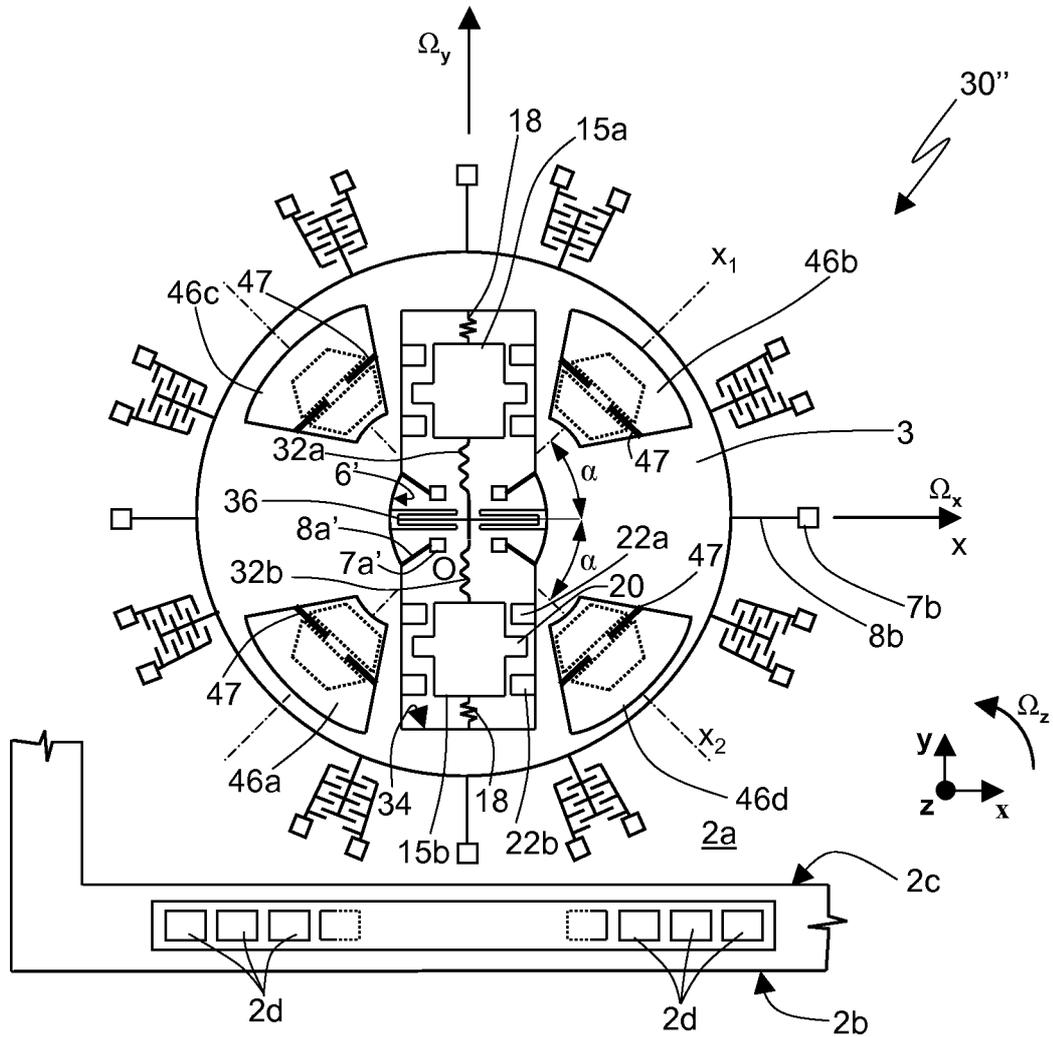


Fig.13

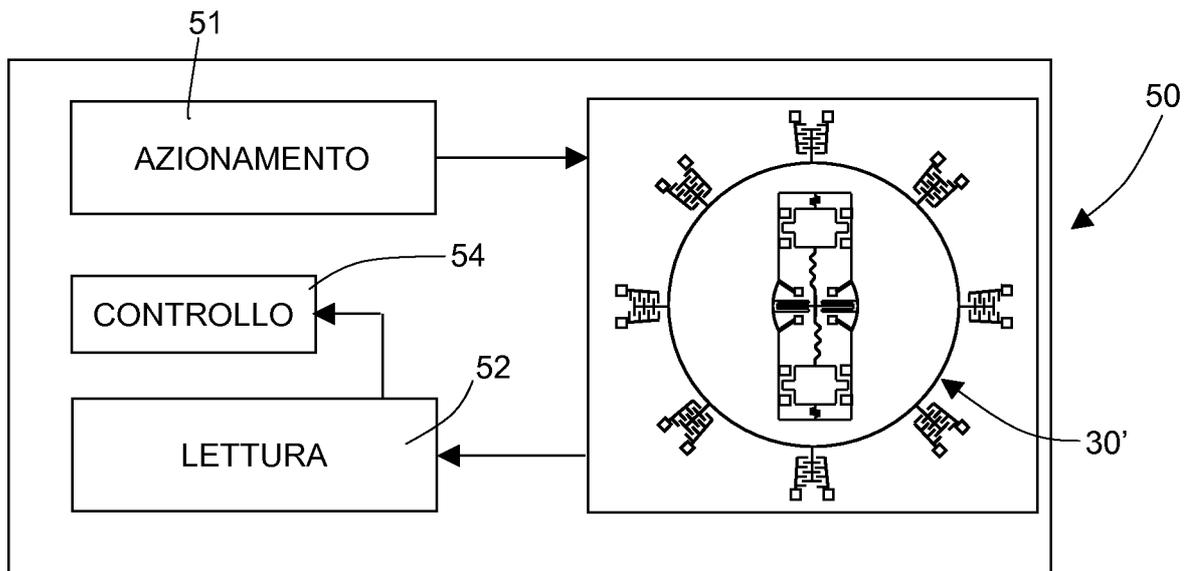


Fig.14