



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102015000078393
Data Deposito	30/11/2015
Data Pubblicazione	30/05/2017

Classifiche IPC

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	02	B	26	08

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	02	B	26	10

Titolo

STRUTTURA MICROMECCANICA AD ATTUAZIONE BIASSIALE E RELATIVO DISPOSITIVO MEMS

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"STRUTTURA MICROMECCANICA AD ATTUAZIONE BIASSIALE E
RELATIVO DISPOSITIVO MEMS"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI, 2

AGRATE BRIANZA (MB)

Inventori: CARMINATI Roberto

* * *

La presente invenzione è relativa ad una struttura micromeccanica ad attuazione biassiale e ad un relativo dispositivo MEMS (Micro-Electromechanical Systems); in particolare, la presente trattazione si riferirà ad una struttura micromeccanica di riflettore (anche detta microspecchio, "micromirror") per un dispositivo ottico MEMS, ad esempio un proiettore.

Sono note strutture micromeccaniche di riflettore realizzate, almeno in parte, con materiali semiconduttori e con la tecnologia dei sistemi MEMS.

Tali strutture micromeccaniche possono essere integrate in apparecchi elettronici portatili, quali ad esempio tablet, smartphone, PDA, per applicazioni ottiche, in particolare per indirizzare con modalità desiderate fasci di radiazioni luminose generati da una sorgente di

luce, tipicamente laser. Grazie alle ridotte dimensioni, le strutture micromeccaniche consentono di rispettare requisiti stringenti per quanto riguarda l'occupazione di spazio, in termini di area e spessore.

Ad esempio, strutture micromeccaniche di riflettore vengono utilizzate in dispositivi proiettori miniaturizzati (cosiddetti picoproiettori), in grado di proiettare a distanza immagini o pattern di luce desiderati.

Strutture micromeccaniche di riflettore includono generalmente una struttura mobile, che porta un elemento riflettente o "di specchio" (ovvero, costituito di un materiale avente una elevata riflettività per una particolare lunghezza d'onda, o banda di lunghezze d'onda), realizzata in un corpo di materiale semiconduttore in modo tale da risultare mobile, ad esempio con movimento di inclinazione e/o rotazione, per indirizzare in maniera desiderata un fascio luminoso incidente variandone una direzione di propagazione; ed una struttura di supporto, anch'essa realizzata a partire da un corpo di materiale semiconduttore, accoppiata alla struttura mobile, avente funzioni di supporto e manipolazione ("handling"). Nella struttura di supporto viene generalmente realizzata una cavità, al di sotto ed in corrispondenza della struttura mobile con il relativo elemento riflettente, in modo da consentirne la libertà di movimento e la rotazione.

Tipicamente, la direzione di propagazione del fascio ottico viene variata in modo periodico o quasi periodico, in modo da effettuare una scansione di una porzione di spazio con il fascio ottico riflesso. In particolare, nel caso di strutture micromeccaniche di riflettore di tipo risonante, un sistema di azionamento fa oscillare l'elemento riflettente in modo sostanzialmente periodico attorno ad una posizione di riposo, il periodo di oscillazione essendo quanto più possibile prossimo alla frequenza di risonanza, al fine di massimizzare la distanza angolare coperta dallo stesso elemento riflettente durante ciascuna oscillazione, e dunque massimizzare la dimensione della porzione di spazio di scansione.

Tra le strutture micromeccaniche di riflettore, sono note strutture ad attuazione biassiale, in cui l'elemento riflettente è azionato rispetto a due differenti assi di azionamento, ortogonali tra loro, secondo una traiettoria di scansione cosiddetta di Lissajous.

La figura 1 illustra in maniera schematica e semplificata una struttura micromeccanica di riflettore, indicata in generale con 1.

La struttura micromeccanica di riflettore 1 comprende:
una cornice 2, nell'esempio avente forma ad anello quadrato in un piano orizzontale xy definito da un primo e da un secondo asse orizzontale x , y (e coincidente con il

piano di una superficie principale 2a della stessa cornice 2); ed

una massa mobile 4, nell'esempio avente forma circolare nello stesso piano orizzontale xy.

La cornice 2 definisce internamente una finestra 5, all'interno della quale è alloggiata la massa mobile 4, ed è collegata mediante primi elementi elastici 6, ad una struttura di ancoraggio 7, esterna alla stessa cornice 2, solidale ad un substrato 8 (mostrato schematicamente) del corpo di materiale semiconduttore in cui la struttura micromeccanica di riflettore 1 è realizzata.

In particolare, i primi elementi elastici 6 si estendono allineati lungo il primo asse orizzontale x, da parti opposte della cornice 2, collegando rispettive porzioni della stessa cornice 2 ad elementi di ancoraggio 7a, 7b della struttura di ancoraggio 7 (costituiti ad esempio, in modo qui non illustrato, da pilastri verticali che si collegano al suddetto substrato 8).

I primi elementi elastici 6 sono cedevoli a torsione, in modo da consentire un movimento di rotazione della cornice 2 rispetto alla struttura di ancoraggio 7 ed al substrato 8, al di fuori del piano orizzontale xy ed intorno al primo asse orizzontale x.

La massa mobile 4 porta superiormente un elemento di specchio 4', costituito da un materiale ad elevata

riflettività per la radiazione luminosa da riflettere, quale ad esempio alluminio o oro, ed è collegata alla cornice 2 mediante secondi elementi elastici 9, i quali si estendono allineati lungo il secondo asse orizzontale y, da parti opposte della stessa massa mobile 4.

I secondi elementi elastici 9 sono cedevoli a torsione, in modo da consentire un movimento di rotazione della massa mobile 4 rispetto alla cornice 2, al di fuori del piano orizzontale xy ed intorno al secondo asse orizzontale y; inoltre, gli stessi secondi elementi elastici 9 sono rigidi rispetto alla flessione, così che la stessa massa mobile 4 risulta accoppiata rigidamente alla cornice 2, nel movimento di rotazione intorno al primo asse orizzontale x.

La struttura micromeccanica di riflettore 1 comprende inoltre: una prima struttura di azionamento 10 (mostrata schematicamente), accoppiata alla cornice 2 e configurata per causarne un movimento di azionamento di rotazione intorno al primo asse orizzontale x, in funzione di opportuni segnali di pilotaggio elettrici tali da generare un momento torcente T_x intorno allo stesso primo asse orizzontale x; ed una seconda struttura di azionamento 11 (anch'essa mostrata schematicamente), accoppiata alla massa mobile 4 e configurata per causarne un rispettivo movimento di azionamento di rotazione intorno al secondo asse

orizzontale y , in funzione di ulteriori segnali di pilotaggio elettrici, tali da generare un rispettivo momento torcente T_y intorno allo stesso secondo asse orizzontale y .

La prima e la seconda struttura di azionamento 10, 11, in funzione dei rispettivi segnali di pilotaggio elettrico, consentono dunque di ruotare la massa mobile 4, e l'associato elemento di specchio 4', intorno al primo ed al secondo asse orizzontale x , y , in tal modo consentendo la realizzazione di un desiderato pattern di scansione biassiale del fascio luminoso riflesso.

Sono stati ad oggi proposti per la realizzazione delle suddette prima e seconda struttura di azionamento 10, 11 i seguenti principi di funzionamento: elettrostatico (in cui rispettivi gruppi di elettrodi interdigitati sono accoppiati alla cornice 2 ed alla massa mobile 4, per la generazione di forze di attrazione elettrostatica e la generazione dei suddetti momenti torcenti T_x , T_y); piezoelettrico (in cui elementi piezoelettrici sono accoppiati meccanicamente ai primi ed ai secondi elementi elastici 6, 9 per causarne la torsione e la conseguente generazione dei momenti torcenti T_x , T_y); ed elettromagnetico (una bobina è in tal caso disposta in corrispondenza della cornice 2, in modo da generare, mediante passaggio di corrente elettrica, un campo

magnetico atto a generare i momenti torcenti T_x , T_y).

Un esempio di realizzazione di una struttura micromeccanica di riflettore operante secondo il principio elettrostatico è ad esempio descritto in US 7,399,652.

La presente Richiedente ha verificato che la soluzione precedentemente descritta, indipendentemente dal principio di azionamento utilizzato, risente di alcune limitazioni per quanto riguarda l'efficienza dell'azionamento e le dimensioni della struttura risultante.

In particolare, sono in generale richiesti elevati valori dei segnali di pilotaggio da fornire alle strutture di azionamento per ottenere i desiderati momenti torcenti T_x , T_y , ad esempio elevate tensioni dell'ordine di 100 V per le strutture di azionamento elettrostatiche o di 50 V per le strutture di azionamento piezoelettriche, o elevate correnti ad esempio dell'ordine di 100 mA, nel caso di strutture di azionamento elettromagnetiche.

Tale problema è evidentemente maggiormente sentito per strutture micromeccaniche ad attuazione biassiale, dove in generale sono richiesti circuiti di pilotaggio e strutture di azionamento distinti per ciascun asse di azionamento (con un incremento conseguente delle dimensioni e dei costi di realizzazione).

Scopo della presente invenzione è quello di risolvere,

almeno in parte, tale problematica che affligge le strutture micromeccaniche di tipo noto, ed in particolare di fornire una struttura con migliorata efficienza di attuazione.

Secondo la presente invenzione vengono pertanto forniti una struttura micromeccanica ed un relativo dispositivo MEMS, come definiti nelle rivendicazioni allegate.

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

- la figura 1 è una vista in pianta dall'alto schematica di una struttura micromeccanica ad attuazione biassiale di tipo noto;

- la figura 2a è una vista prospettica schematica dall'alto di una struttura micromeccanica ad attuazione biassiale secondo una forma di realizzazione della presente soluzione;

- la figura 2b è una vista prospettica schematica dal basso della struttura micromeccanica di figura 2a;

- la figura 2c è una vista in pianta schematica dal basso di una porzione della struttura micromeccanica di figura 2a;

- le figure 3a-3c mostrano viste in pianta schematiche dal basso della porzione della struttura micromeccanica di figura 2a, secondo rispettive varianti realizzative;

- la figura 4 è una vista in pianta schematica dall'alto della porzione della struttura micromeccanica, secondo una differente forma di realizzazione;

- le figure 5a-5b sono viste in pianta schematiche dall'alto e, rispettivamente, dal basso di una struttura micromeccanica ad attuazione biassiale, con struttura di azionamento di tipo elettrostatico;

- le figure 6a-6b sono viste in pianta schematiche dall'alto e, rispettivamente, dal basso di una struttura micromeccanica ad attuazione biassiale, con struttura di azionamento di tipo elettromagnetico;

- le figure 7a-7b sono viste in pianta schematiche dall'alto e, rispettivamente, dal basso di una struttura micromeccanica ad attuazione biassiale, con struttura di azionamento di tipo piezoelettrico;

- la figura 8 è uno schema a blocchi di massima di un dispositivo ottico MEMS includente la struttura micromeccanica di riflettore;

- la figura 9a è una vista prospettica schematica dall'alto di una struttura micromeccanica ad attuazione biassiale secondo una ulteriore forma di realizzazione della presente soluzione; e

- la figura 9b è una vista in pianta schematica dal basso di una porzione della struttura micromeccanica di figura 9a.

Come illustrato schematicamente in figura 2a, secondo una forma di realizzazione della presente soluzione, una struttura micromeccanica ad attuazione biassiale, in particolare una struttura micromeccanica di riflettore 20, presenta una configurazione sostanzialmente equivalente a quanto discusso con riferimento alla figura 1, avendo dunque: la cornice 2 (in generale, vengono utilizzati gli stessi numeri di riferimento per indicare elementi aventi struttura e funzione analoga ad altri discussi in precedenza), accoppiata elasticamente mediante i primi elementi elastici 6 alla struttura di ancoraggio 7; e la massa mobile 4, che è disposta nella finestra 5 definita internamente dalla cornice 2, porta l'elemento di specchio 4' ed è accoppiata elasticamente alla stessa cornice 2 mediante i secondi elementi elastici 9.

Come precedentemente descritto, i primi elementi elastici 6, di tipo torsionale, sono configurati per consentire il movimento di rotazione della cornice 2 rispetto alla struttura di ancoraggio 7 ed al substrato 8 del corpo di materiale semiconduttore in cui è realizzata la struttura micromeccanica di riflettore 20, al di fuori del piano orizzontale xy e intorno al primo asse

orizzontale x.

Inoltre, i secondi elementi elastici 9, anch'essi di tipo torsionale, sono configurati per consentire il movimento di rotazione della massa mobile 4 rispetto alla cornice 2, al di fuori del piano orizzontale xy ed intorno al secondo asse orizzontale y; gli stessi secondi elementi elastici 9 sono configurati per accoppiare rigidamente la massa mobile 4 alla cornice 2, nel movimento di azionamento di rotazione della stessa cornice 2 intorno al primo asse orizzontale x.

Secondo un aspetto particolare della presente soluzione, alla massa mobile 4 è associata una distribuzione di massa specificatamente progettata per generare, per effetto inerziale, un momento torcente, nuovamente indicato con T_y , intorno al secondo asse orizzontale y in risposta alla rotazione della cornice 2 (e della stessa massa mobile 4) intorno al primo asse orizzontale x.

Di conseguenza, la struttura micromeccanica di riflettore 20 può comprendere in questo caso una singola struttura di azionamento (coincidente con la prima struttura di azionamento 10 mostrata in figura 1, per questo indicata con lo stesso numero di riferimento). La struttura di azionamento 10 è accoppiata alla cornice 2 e configurata per causarne il movimento di azionamento, in

questo caso di rotazione, intorno al primo asse orizzontale x , in funzione di opportuni segnali di pilotaggio elettrici per generare il momento torcente T_x intorno allo stesso primo asse orizzontale x .

Grazie al suddetto accoppiamento inerziale, non è richiesta, e può dunque vantaggiosamente non essere presente, un'ulteriore e distinta struttura di azionamento, accoppiata alla massa mobile 4 per causarne la rotazione intorno al secondo asse orizzontale y (tale rotazione è infatti generata per accoppiamento inerziale di forza).

In particolare, e come illustrato ad esempio nelle figure 2b-2c, la distribuzione di massa della massa mobile 4 risulta asimmetrica nel piano orizzontale xy , rispetto ad almeno uno, o ad entrambi, gli assi orizzontali x , y (ovvero agli assi di rotazione della massa mobile 4).

Secondo un aspetto della presente soluzione, la distribuzione della massa mobile 4 risulta asimmetrica rispetto almeno al secondo asse orizzontale y , ovvero all'asse di rotazione della stessa massa mobile 4.

Come illustrato schematicamente nelle suddette figure 2b e 2c, la massa mobile 4 è idealmente divisa nel piano orizzontale xy in quattro quadranti dagli assi orizzontali x e y , che si incrociano in corrispondenza di un centro geometrico O della stessa massa mobile 4.

In una possibile forma di realizzazione, alla massa

mobile 4 sono associate porzioni aggiuntive di massa 22a, 22b disposte in quadranti opposti (nell'esempio il secondo e quarto quadrante) rispetto al centro geometrico O.

Tali porzioni aggiuntive di massa 22a, 22b hanno rispettivi baricentri B, B' disposti a distanza dagli assi orizzontali x, y, simmetrici rispetto al centro geometrico O ed allineati lungo una direzione diagonale d, inclinata (ad esempio di 45°) rispetto agli stessi assi orizzontali x, y.

Le porzioni aggiuntive di massa 22a, 22b presentano, nell'esempio, una conformazione a porzione di anello circolare (nell'esempio con estensione angolare di 90°).

La rotazione della massa mobile 4 intorno al primo asse orizzontale x (per effetto dell'accoppiamento alla cornice 2, che viene opportunamente pilotata per il suo azionamento) genera una forza inerziale F sulla stessa massa mobile 4, che, applicata in corrispondenza dei rispettivi baricentri B, B' (in versi opposti rispetto al piano orizzontale xy), origina il momento torcente T_y intorno al secondo asse orizzontale y.

La presente Richiedente ha verificato che una distribuzione asimmetrica di massa per la massa mobile 4 crea termini diagonali nella matrice di accoppiamento di massa del sistema meccanico, creando cioè un trasferimento di forza tra il primo ed il secondo asse orizzontale x, y

altrimenti tra loro indipendenti (andando dunque ad accoppiare, per effetto inerziale, ovvero attraverso la matrice di massa, gli stessi assi orizzontali x, y).

In particolare, una distribuzione "diagonale" di massa, del tipo precedentemente descritto, è stato verificato generare un maggiore trasferimento di forza tra gli assi orizzontali x, y.

In maggiore dettaglio, e facendo nuovamente riferimento alla figura 2a, si indica con: θ , l'angolo di rotazione della cornice 2 (e della massa mobile 4 ad essa accoppiata) intorno al primo asse orizzontale x; ϕ , l'angolo di rotazione della massa mobile 4 (e dell'associato elemento di specchio 4') intorno al secondo asse orizzontale y; ed α , l'angolo di rotazione della cornice 2 intorno allo stesso secondo asse orizzontale y.

Si considera infatti che i primi elementi elastici 6 non siano del tutto rigidi alla torsione rispetto a tale secondo asse orizzontale y; in altre parole, la cornice 2 presenta capacità di ruotare, seppur in maniera limitata dovuta alla maggior rigidezza degli stessi primi elementi elastici 6, anche intorno al secondo asse orizzontale y.

Utilizzando la teoria meccanica lagrangiana è possibile ricavare la seguente equazione del moto per il sistema della struttura micromeccanica di riflettore 20:

$$M \frac{d^2}{dt^2} \tilde{q}(t) + B \frac{d}{dt} \tilde{q}(t) + K \tilde{q}(t) = \tilde{T}(t)$$

in cui:

$\bar{q}(t) = (\theta, \alpha, \varphi)^T$ indica il vettore di coordinate lagrangiane;

M indica la matrice di massa del sistema;

B indica la matrice di dissipazione del sistema;

K indica la matrice di rigidità del sistema; e

$\bar{T}(t) = (T_x, T_y, 0)^T$ indica il vettore dei momenti torcenti forzanti applicati alla cornice 2, in particolare tramite la struttura di azionamento 10.

Applicando la trasformata di Laplace alla precedente equazione, si ottiene:

$$Ms^2\bar{q}(s) + Bs\bar{q}(s) + K\bar{q}(s) = \bar{T}(s)$$

dove $s = j\omega$ rappresenta la coordinata nel dominio delle frequenze ω (e j rappresenta l'unità immaginaria).

Per un sistema con una distribuzione di massa simmetrica per entrambe la cornice 2 e la massa mobile 4 (come nelle strutture di arte nota), tale equazione assumerebbe la forma esplicita:

$$\begin{pmatrix} J_\theta & 0 & 0 \\ J_{\theta\alpha} & J_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & J_\varphi \end{pmatrix} s^2 \begin{pmatrix} \theta \\ \alpha \\ \varphi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_\theta & 0 & 0 \\ 0 & b_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & b_\varphi \end{pmatrix} s \begin{pmatrix} \theta \\ \alpha \\ \varphi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_\theta & 0 & 0 \\ 0 & k_\alpha + k_\varphi & -k_\varphi \\ 0 & -k_\varphi & k_\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \alpha \\ \varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ 0 \end{pmatrix}$$

in cui i termini J (J_θ , J_α , J_φ) indicano i momenti di inerzia, i termini b (b_θ , b_α , b_φ) i coefficienti di dissipazione, ed i temrmini k (k_θ , k_α , k_φ) le costanti

elastiche (i suffissi ad indicare in maniera intuitiva il grado di libertà a cui i vari termini si riferiscono).

Dalla suddetta equazione emerge in particolare che il grado di libertà θ risulta in tal caso disaccoppiato dagli altri gradi di libertà, α e φ , e che, in tal maniera, il momento torcente T_x produce risposta solo sul grado di libertà θ , ma non sugli altri gradi di libertà, α e φ .

Al contrario, nella presente soluzione, con una distribuzione di massa asimmetrica della massa mobile 4 rispetto ad almeno uno degli, o ad entrambi gli assi orizzontali x e y , la suddetta equazione assume la forma:

$$\begin{pmatrix} J_\theta & J_{\theta\alpha} & J_{\theta\varphi} \\ J_{\theta\alpha} & J_\alpha & 0 \\ J_{\theta\varphi} & 0 & J_\varphi \end{pmatrix} s^2 \begin{pmatrix} \theta \\ \alpha \\ \varphi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_\theta & 0 & 0 \\ 0 & b_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & b_\varphi \end{pmatrix} s \begin{pmatrix} \theta \\ \alpha \\ \varphi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_\theta & 0 & 0 \\ 0 & k_\alpha + k_\varphi & -k_\varphi \\ 0 & -k_\varphi & k_\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ 0 \end{pmatrix}$$

in cui la distribuzione di massa asimmetrica comporta la nascita di elementi fuori-diagonale nella matrice di massa, o di accoppiamento inerziale, $J_{\theta\alpha}$ e $J_{\theta\varphi}$, che permettono l'accoppiamento delle equazioni del moto e la possibilità di sfruttare il momento torcente T_x intorno al primo asse orizzontale x per eccitare il grado di libertà φ che agisce lungo il secondo asse orizzontale y .

Si sottolinea che l'accoppiamento descritto è di tipo dinamico (ovvero, si verifica generalmente per condizioni di funzionamento risonante); si richiede dunque

generalmente la presenza di un azionamento risonante intorno ad almeno uno degli assi orizzontali x , y , in questo caso il primo asse orizzontale x .

Nella forma di realizzazione illustrata nelle suddette figure 2b, 2c, una porzione di corpo della massa mobile 4, che porta l'elemento di specchio 4', è realizzata in uno strato superficiale 24 (del corpo di materiale semiconduttore), a partire dal quale sono definiti inoltre la cornice 2 ed i primi ed i secondi elementi elastici 6, 9; le porzioni aggiuntive di massa 22a, 22b sono in tal caso definite a partire da uno strato strutturale 25, disposto al di sotto dello strato superficiale 24 (rispetto ad un asse verticale z che definisce una terna di assi cartesiani con il primo ed il secondo asse orizzontale x , y) da parte opposta rispetto all'elemento di specchio 4', ed accoppiate alla stessa porzione di corpo.

Come mostrato in figura 2b, a partire dallo stesso strato strutturale 25 può inoltre essere definita una porzione di rinforzo 26 della cornice 2, disposta al di sotto della stessa cornice 2 rispetto all'asse verticale z ; tale porzione di rinforzo 26 presenta una distribuzione di massa simmetrica nel piano orizzontale xy , avendo una conformazione ad anello che replica la geometria della cornice 2.

È in ogni caso evidente che la soluzione di

accoppiamento inerziale precedentemente discussa può essere implementata con svariate differenti distribuzioni asimmetriche di massa per la massa mobile 4.

Ad esempio, la figura 3a mostra una possibile forma di realizzazione in cui è presente una sola porzione aggiuntiva di massa, indicata con 22a (sostanzialmente a forma di "C"), che risulta asimmetrica rispetto agli assi orizzontali x , y estendendosi ad anello circolare incompleto per tre dei quattro quadranti in cui è suddivisa la massa mobile 4 nel piano orizzontale xy .

La porzione aggiuntiva di massa 22a presenta in questo caso un baricentro B disposto nel terzo quadrante, in corrispondenza del quale si applica la forza inerziale F dovuta alla rotazione della massa mobile 4 intorno al primo asse orizzontale x ; tale forza inerziale F genera anche in questo caso un momento torcente T_y intorno al secondo asse orizzontale y , come risulterà evidente dall'esame della stessa figura 3a.

La figura 3b mostra una possibile ulteriore forma di realizzazione, che differisce per una differente distribuzione asimmetrica di massa per la massa mobile 4.

In questo caso, le porzioni aggiuntive di massa 22a, 22b sono disposte in posizione radialmente più esterna rispetto all'ingombro della massa mobile 4 nel piano orizzontale xy (e rispetto alla forma di realizzazione di

figura 2c).

Questa soluzione può avere il vantaggio di incrementare il momento torcente T_y , a parità di forza di azionamento.

Come mostrato in figura 3c, una ulteriore variante può prevedere che le porzioni aggiuntive di massa 22a, 22b, aventi in questo caso una conformazione a "quarto di cerchio" nel piano orizzontale xy, siano unite da una porzione di raccordo 22c in corrispondenza del centro geometrico O.

Una ulteriore forma di realizzazione della presente soluzione, si veda la figura 4, prevede invece che la distribuzione asimmetrica di massa della massa mobile 4 si ottenga definendo lo stesso strato superficiale 24 in cui è realizzata la porzione di corpo della stessa massa mobile 4, anziché uno strato strutturale sottostante lo strato superficiale 24.

In questo caso, le porzioni aggiuntive di massa 22a, 22b sono definite a partire dallo strato superficiale 24 (trovandosi dunque allo stesso livello della porzione di corpo della massa mobile 4), estendendosi simmetricamente rispetto al centro geometrico O e parallele al secondo asse orizzontale y, da parti opposte della massa mobile 4 rispetto al primo asse orizzontale x. In questo caso, le porzioni aggiuntive di massa 22a, 22b sono accoppiate

integralmente alla massa mobile 4.

Tale soluzione può avere il vantaggio di presentare una più semplice realizzazione, dato che richiede la lavorazione di un solo strato di materiale semiconduttore (il suddetto strato superficiale 24).

Indipendentemente dalla configurazione della distribuzione asimmetrica di massa associata alla massa mobile 4, la soluzione di accoppiamento inerziale discussa si applica vantaggiosamente per qualsiasi tipologia di azionamento prevista per causare la rotazione della cornice 2 intorno al primo asse orizzontale x (ovvero: di tipo elettrostatico, elettromagnetico o piezoelettrico).

A questo riguardo, le figure 5a e 5b mostrano schematicamente una forma di realizzazione di tipo elettrostatico per la struttura di azionamento 10 accoppiata alla cornice 2 (in particolare, la figura 5b mostra, a solo titolo esemplificativo, una distribuzione asimmetrica di massa analoga a quella descritta con riferimento alla figura 3c).

In questo caso, la struttura di azionamento 10 comprende un unico gruppo di elettrodi interdigitati 28 accoppiati alla cornice 2, per la generazione di forze di attrazione elettrostatica tali da generare il momento torcente T_x intorno al primo asse orizzontale x .

Il gruppo di elettrodi interdigitati 28 comprende:

elettrodi mobili 28a portati dalla cornice 2, in particolare da porzioni della cornice 2 parallele al primo asse orizzontale x (a cui sono accoppiati i secondi elementi elastici 9); ed elettrodi fissi 28b, portati da una struttura fissa 29, solidale al substrato 8 del corpo di materiale semiconduttore in cui la struttura micromeccanica di riflettore 20 è realizzata.

Gli elettrodi mobili 28a e gli elettrodi fissi 28b si estendono paralleli tra loro ed al secondo asse orizzontale y , e sono interdigitati nel piano orizzontale xy e disposti ad altezze diverse lungo l'asse verticale z .

In maniera di per sé nota, l'applicazione di opportuni segnali di pilotaggio agli elettrodi mobili e fissi 28a, 28b consente la generazione di forze di attrazione elettrostatica per causare la rotazione della cornice 2 (e della massa mobile 4) intorno al primo asse x .

Si sottolinea nuovamente che, secondo la presente soluzione, può essere utilizzato soltanto un unico gruppo di elettrodi 28 per l'azionamento della cornice 2, sfruttando l'accoppiamento inerziale dovuto alla distribuzione asimmetrica di massa associata alla massa mobile 4 per la generazione del momento torcente T_y atto a causare la rotazione della stessa massa mobile 4 intorno al secondo asse orizzontale y (in altre parole, la presente soluzione non richiede la presenza di elettrodi accoppiati

alla massa mobile 4 o ai secondi elementi elastici 9).

Come mostrato nelle figure 6a e 6b, in una differente forma di realizzazione, di tipo elettromagnetico, la struttura di azionamento 10 accoppiata alla cornice 2 comprende una spira 32 disposta sulla cornice 2 (nell'esempio, occupante un'area avente una conformazione ad anello quadrato che si estende lungo l'intero perimetro della stessa cornice 2).

In maniera di per sé nota, il movimento di rotazione della cornice 2 è in questo caso ottenuto a partire dalla forza di Lorenz, generata in seguito al passaggio di una opportuna corrente elettrica di pilotaggio attraverso la spira 32.

Con riferimento alle figure 7a e 7b, una ulteriore forma di realizzazione della struttura di azionamento 10, di tipo piezoelettrico, prevede che la stessa struttura di azionamento 10 comprenda un primo ed un secondo elemento a trave sottile 34a, 34b, collegati meccanicamente a prolungamenti 37 della cornice 2, che si estendono lungo il primo asse orizzontale x , centralmente e da parti opposte rispetto alla stessa cornice 2.

Gli elementi a trave sottile 34a, 34b si estendono parallelamente al secondo asse y (con estensione trascurabile lungo l'asse verticale z) e portano rispettivi attuatori piezoelettrici 35a, 35b.

In maniera di per sé nota, l'applicazione di opportune tensioni di pilotaggio ai suddetti attuatori piezoelettrici 35a, 35b causa la rotazione degli elementi a trave 34a, 34b e, di conseguenza, della cornice 2 intorno al primo asse orizzontale x , con la conseguente generazione del momento torcente T_x .

Anche in questo caso, è possibile utilizzare attuatori piezoelettrici 35a, 35b dedicati alla sola rotazione intorno al primo asse orizzontale x , nuovamente sfruttando l'accoppiamento inerziale dovuto alla distribuzione asimmetrica di massa associata alla massa mobile 4 per la generazione del momento torcente T_y intorno al secondo asse orizzontale y .

I vantaggi della soluzione descritta emergono in maniera evidente dalla discussione precedente.

Si sottolinea comunque il fatto che l'accoppiamento inerziale dovuto alla distribuzione di massa asimmetrica associata alla massa mobile 4 della struttura micromeccanica di riflettore 20 consente la possibilità di utilizzare soltanto un'unica struttura di azionamento, dedicata alla movimentazione della cornice 2, ad esempio la sua rotazione intorno al primo asse orizzontale x , comunque ottenendo una attuazione biassiale della massa mobile 4 grazie all'accoppiamento di massa.

In ogni caso, la presente soluzione consente di

massimizzare l'efficienza di attuazione della massa mobile 4, in virtù dell'accoppiamento inerziale di forza con la stessa cornice 2.

Si evidenzia inoltre che il procedimento utilizzato per la fabbricazione della struttura micromeccanica di riflettore 20 non prevede sostanziali modifiche rispetto a procedimenti tradizionali, prevedendo infatti la definizione, con tecniche note e già utilizzate per la definizione dei restanti elementi strutturali, di uno strato superficiale 24 ed eventualmente di uno strato strutturale 25, entrambi già presenti nella stessa struttura micromeccanica di riflettore 20.

La presente soluzione risulta inoltre vantaggiosamente applicabile per svariate strutture micromeccaniche di riflettore 20, ad esempio operanti secondo i principi di azionamento elettrostatico, elettromagnetico o piezoelettrico, in cui sia preferibilmente presente almeno un movimento di azionamento risonante.

Le suddette caratteristiche rendono particolarmente vantaggioso l'utilizzo della struttura micromeccanica in dispositivi ottici integrati all'interno di apparecchi portatili.

Ad esempio, la figura 8 mostra schematicamente l'impiego della struttura micromeccanica di riflettore 20 in un dispositivo proiettore 40 di un apparecchio portatile

43 (quale ad esempio uno smartphone).

In particolare, la struttura micromeccanica di riflettore 20 viene pilotata in modo da proiettare un fascio luminoso F generato da una sorgente di luce 46, ad esempio una sorgente di luce coerente di tipo Laser, secondo un pattern di scansione desiderato.

Il dispositivo proiettore 40 comprende inoltre un circuito elettronico 48 di controllo e pilotaggio, in grado di fornire opportuni segnali di pilotaggio sia alla sorgente di luce 46 sia alla struttura micromeccanica di riflettore 20, per variarne la posizione e l'orientamento secondo il pattern di scansione desiderato per il fascio luminoso riflesso.

Vantaggiosamente, il circuito elettronico 48 può essere realizzato in maniera integrata con le tecniche dei semiconduttori, eventualmente nella stessa piastrina in cui è realizzata la struttura micromeccanica di riflettore 20.

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 la effettiva distribuzione di massa asimmetrica associata alla massa mobile 4 della struttura micromeccanica di riflettore 20

può differire da quanto illustrato precedentemente, eventualmente anche in funzione di un differente movimento di azionamento previsto per la movimentazione della cornice 2 (e della massa mobile 4, accoppiata rigidamente alla stessa cornice 2 nel suo movimento di azionamento).

Ad esempio, come mostrato in figura 9a, la cornice 2 può essere azionata dalla relativa struttura di azionamento 10 (illustrata schematicamente) in modo tale da avere un movimento di azionamento di traslazione lungo l'asse verticale z (indicato con M_z).

In questo caso, come mostrato in figura 9b, la distribuzione di massa associata alla massa mobile 4, asimmetrica rispetto al secondo asse orizzontale y , può prevedere un'unica porzione aggiuntiva di massa 22a, avente conformazione a semicerchio nel piano orizzontale xy , interamente disposta da un lato del secondo asse orizzontale y (occupando cioè il primo ed il secondo quadrante precedentemente definiti), con baricentro B disposto a distanza dallo stesso secondo asse orizzontale y .

In maniera evidente, la traslazione lungo l'asse verticale z genera, per effetto inerziale, il momento torcente T_y e la conseguente rotazione della massa mobile 4 intorno al secondo asse orizzontale y .

Anche per questa specifica forma di realizzazione,

possono essere previste differenti distribuzioni asimmetriche di massa per la massa mobile 4, purché l'unica porzione aggiuntiva di massa 22a presenti un baricentro B posto a distanza del secondo asse orizzontale y.

Inoltre, nella struttura micromeccanica di riflettore 20 può comunque essere previsto una struttura di azionamento per generare un movimento di rotazione della massa mobile 4 intorno al secondo asse orizzontale y (in questo caso, il momento torcente T_y generato per effetto dell'accoppiamento inerziale andando a sommarsi a tale ulteriore movimento di azionamento, in ogni caso incrementando l'efficienza meccanica del sistema).

La struttura micromeccanica precedentemente descritta può in generale essere utilizzata in un qualsiasi dispositivo MEMS, per generare, con ridotta occupazione degli spazi ed elevata efficienza, la rotazione di una massa mobile intorno ad un asse di rotazione in seguito all'azionamento di un attuatore lungo, o intorno ad, un asse di azionamento trasversale allo stesso asse di rotazione.

RIVENDICAZIONI

1. Struttura micromeccanica (20), ad azionamento biassiale, comprendente:

una cornice (2) definente internamente una finestra (5) e collegata elasticamente ad una struttura di ancoraggio (7), solidale ad un substrato (8), mediante primi elementi elastici (6);

una struttura di azionamento (10) accoppiata operativamente a detta cornice (2) e configurata per generare un primo movimento di azionamento di detta cornice (2) rispetto ad un primo asse di azionamento (x; z);

una massa mobile (4) disposta all'interno di detta finestra (5) ed accoppiata elasticamente a detta cornice (2) mediante secondi elementi elastici (9), di tipo torsionale, configurati in modo tale che detta massa mobile (4) sia accoppiata rigidamente a detta cornice (2) in detto primo movimento di azionamento e definenti inoltre un secondo asse di azionamento (y), torsionale, per detta massa mobile (4),

caratterizzata dal fatto che a detta massa mobile (4) è associata una distribuzione di massa, asimmetrica almeno rispetto a detto secondo asse di azionamento (y), configurata in modo da generare per effetto inerziale, in funzione di detto primo movimento di azionamento, un secondo movimento di azionamento, di rotazione della massa

mobile (4) intorno al secondo asse di azionamento (y).

2. Struttura micromeccanica secondo la rivendicazione 1, in cui detta distribuzione di massa è atta a generare, nell'equazione di moto di detta struttura micromeccanica (20), una matrice di massa (M) avente termini di accoppiamento inerziale ($J_{\theta\dot{x}}$, $J_{\dot{\theta}x}$) tra il primo movimento di azionamento di detta cornice (2) e la rotazione di detta massa mobile (4).

3. Struttura micromeccanica secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui detta distribuzione di massa definisce almeno un baricentro (B) disposto a distanza dal secondo asse di azionamento (y), in corrispondenza del quale è atta ad essere originata una forza inerziale (F), in seguito a detto primo movimento di azionamento, generante un momento torcente (T_y) per la rotazione di detta massa mobile (4) intorno a detto secondo asse di azionamento (y).

4. Struttura micromeccanica secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detti primi elementi elastici (6) sono di tipo torsionale e detto primo asse di azionamento (x) definisce un asse di rotazione, detto primo movimento di azionamento essendo una rotazione di detta cornice (2) intorno a detto primo asse di azionamento (x).

5. Struttura micromeccanica secondo la rivendicazione 4, in cui detti primo (x) e secondo (y) asse di azionamento

definiscono un piano orizzontale (zy), parallelo ad una superficie principale (2a) di detta cornice (2); in cui detta massa mobile (4) presenta in detto piano orizzontale (xy) un centro geometrico (O), e detta distribuzione di massa include una prima (22a) ed una seconda (22b) porzione aggiuntiva di massa, disposte simmetricamente rispetto a detto centro geometrico (O) allineate lungo una direzione diagonale (d), inclinata rispetto a detti primo (x) e secondo (y) asse di azionamento.

6. Struttura micromeccanica secondo la rivendicazione 5, in cui detta massa mobile (4) presenta nel piano orizzontale (xy) una conformazione circolare, e dette prima (22a) e seconda (22b) porzione aggiuntiva di massa presentano, nel piano orizzontale (xy), una conformazione di quadrante circolare e sono unite da una porzione di raccordo (22c) in corrispondenza del centro geometrico (O).

7. Struttura micromeccanica secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 4-6, in cui detta massa mobile (4) comprende una porzione di corpo formata in uno strato superficiale (24), disposto a distanza da detto substrato (8) rispetto ad un asse verticale (z) che definisce una terna di assi cartesiani con il primo (x) ed il secondo (y) asse di azionamento; e detta distribuzione di massa include almeno una porzione aggiuntiva di massa (22a) formata in uno strato strutturale (25), disposto al di sotto dello

strato superficiale (24) rispetto a detto asse verticale (z) nella direzione di detto substrato (8).

8. Struttura micromeccanica secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 4-6, in cui detta massa mobile (4) comprende una porzione di corpo formata in uno strato superficiale (24), disposto a distanza da detto substrato (8) rispetto ad un asse verticale (z) che definisce una terna di assi cartesiani con il primo (x) ed il secondo (y) asse di azionamento; e detta distribuzione di massa include almeno una porzione aggiuntiva di massa (22a) formata anch'essa in detto strato superficiale (24) ed accoppiata a detta porzione di corpo.

9. Struttura micromeccanica secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detto primo movimento di azionamento è un movimento risonante, e detta struttura di azionamento (10) opera in base ad un principio operativo a scelta tra: elettrostatico; elettromagnetico; piezoelettrico.

10. Dispositivo MEMS (40), di tipo ottico, comprendente: una struttura micromeccanica (20) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detta massa mobile (4) porta un elemento riflettore (4'); ed una sorgente di luce (46) azionabile per generare un fascio luminoso (F) incidente su detto elemento riflettore (4'); in cui l'azionamento biassiale di detta massa mobile (4) è

atto a generare un movimento desiderato di detto elemento riflettore (4'), per la riflessione di detto fascio luminoso (F).

11. Dispositivo MEMS secondo la rivendicazione 10, comprendente inoltre un circuito elettronico (48), configurato in modo da fornire segnali di pilotaggio alla sorgente di luce (46) ed alla struttura micromeccanica di riflettore (20), per generare un pattern di scansione desiderato per il fascio luminoso riflesso.

12. Procedimento di fabbricazione di una struttura micromeccanica (20), ad azionamento biassiale, comprendente:

formare una cornice (2) definente internamente una finestra (5) e collegata elasticamente ad una struttura di ancoraggio (7), solidale ad un substrato (8), mediante primi elementi elastici (6);

formare una struttura di azionamento (10) accoppiata operativamente a detta cornice (2) e configurata per generare un primo movimento di azionamento di detta cornice (2) rispetto ad un primo asse di azionamento (x; z);

formare una massa mobile (4) all'interno di detta finestra (5), accoppiata elasticamente a detta cornice (2) mediante secondi elementi elastici (9), di tipo torsionale, configurati in modo tale che detta massa mobile (4) sia accoppiata rigidamente a detta cornice (2) in detto primo

movimento di azionamento e definenti inoltre un secondo asse di azionamento (y), torsionale, per detta massa mobile (4),

caratterizzato dal fatto di associare a detta massa mobile (4) una distribuzione di massa, asimmetrica almeno rispetto a detto secondo asse di azionamento (y), configurata in modo da generare per effetto inerziale, in funzione di detto primo movimento di azionamento, un secondo movimento di azionamento, di rotazione della massa mobile (4) intorno al secondo asse di azionamento (y).

13. Procedimento di fabbricazione secondo la rivendicazione 12, in cui detta distribuzione di massa è atta a generare, nell'equazione di moto di detta struttura micromeccanica (20), una matrice di massa (M) avente termini di accoppiamento inerziale ($J_{\theta\omega}$, $J_{\theta\phi}$) tra il primo movimento di azionamento di detta cornice (2) e la rotazione di detta massa mobile (4).

14. Procedimento di fabbricazione secondo la rivendicazione 12 o 13, in cui formare una massa mobile (4) comprende formare una porzione di corpo di detta massa mobile (4) in uno strato superficiale (24), disposto a distanza da detto substrato (8) rispetto ad un asse verticale (z) che definisce una terna di assi cartesiani con il primo (x) ed il secondo (y) asse di azionamento; ed associare a detta massa mobile (4) una distribuzione di

massa include formare almeno una porzione aggiuntiva di massa (22a) in uno strato strutturale (25), disposto al di sotto dello strato superficiale (24) rispetto a detto asse verticale (z) nella direzione di detto substrato (8).

15. Procedimento di fabbricazione secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 12-14, in cui formare una massa mobile (4) comprende formare una porzione di corpo di detta massa mobile (4) in uno strato superficiale (24), disposto a distanza da detto substrato (8) rispetto ad un asse verticale (z) che definisce una terna di assi cartesiani con il primo (x) ed il secondo (y) asse di azionamento; ed associare a detta massa mobile (4) una distribuzione di massa include formare almeno una porzione aggiuntiva di massa (22a) in detto strato superficiale (24), accoppiata a detta porzione di corpo.

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

Lorenzo NANNUCCI

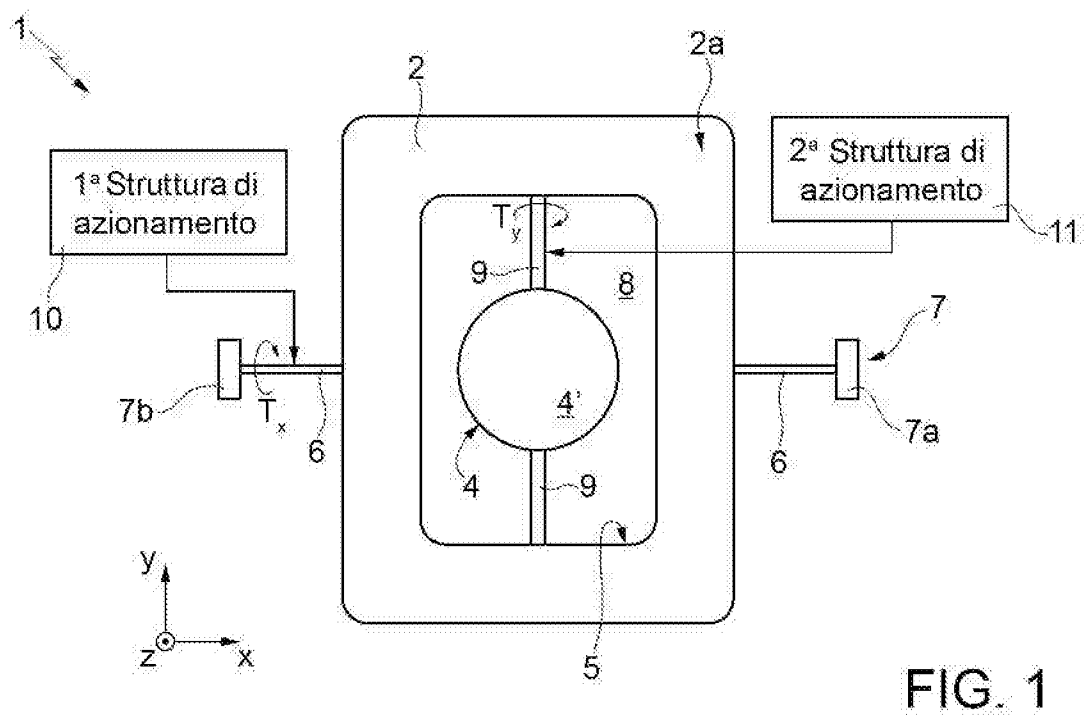


FIG. 1

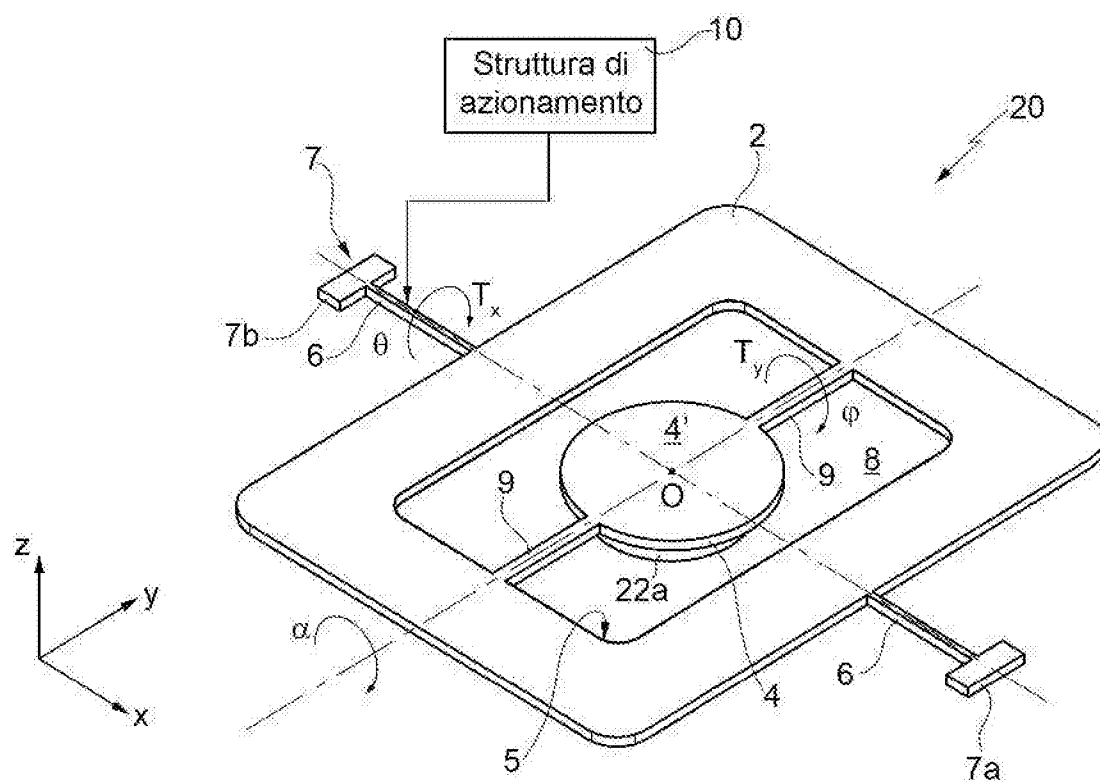


FIG. 2A

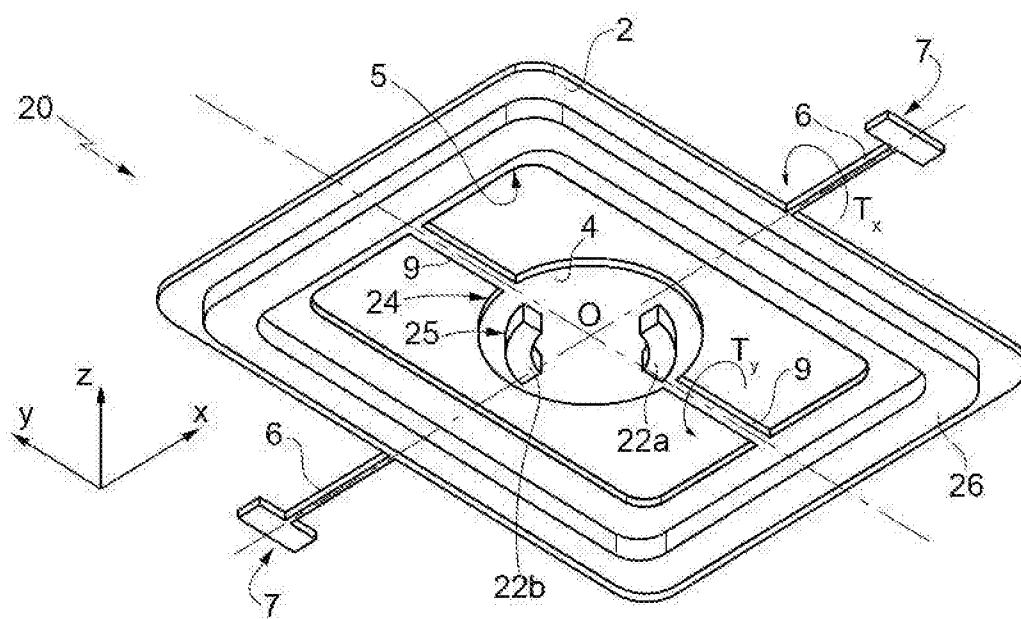


FIG. 2B

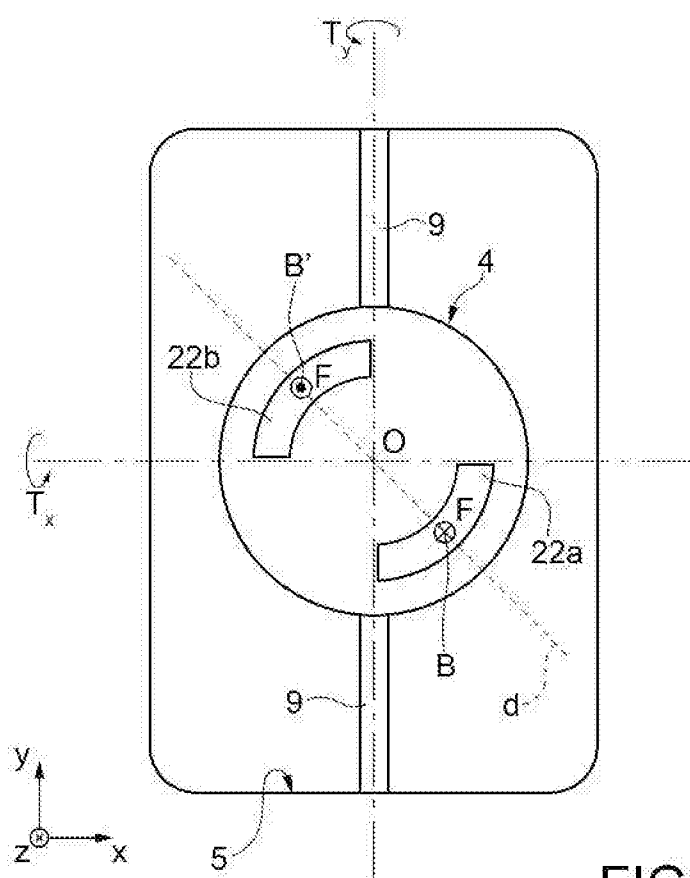


FIG. 2C

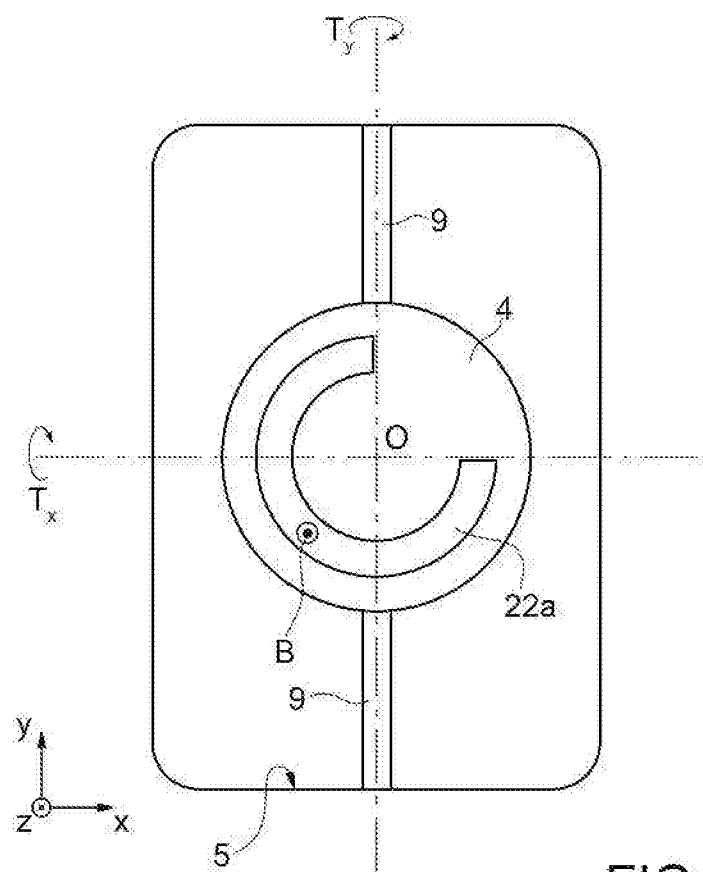


FIG. 3A

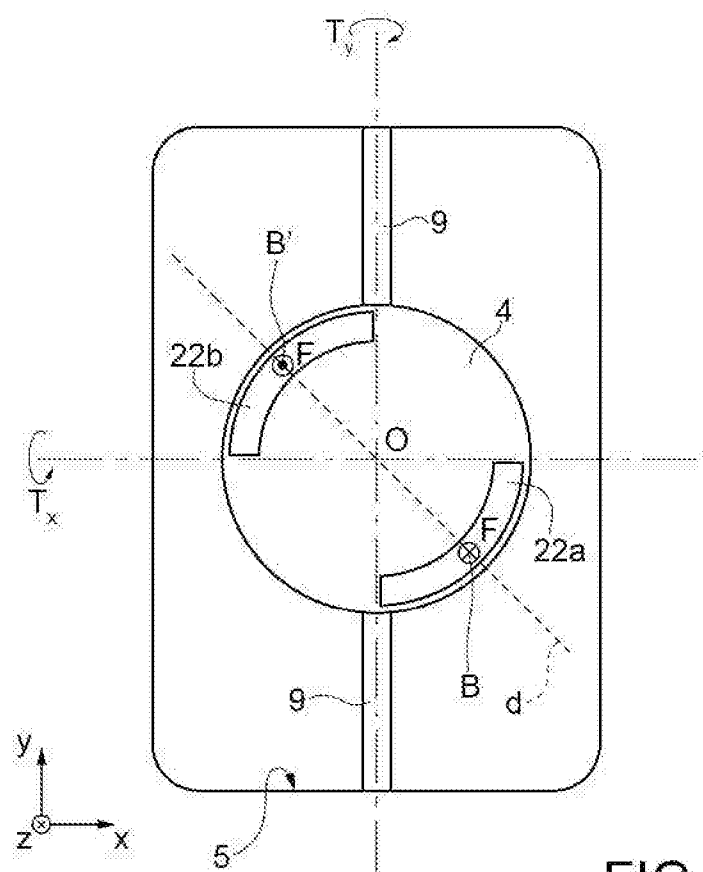


FIG. 3B

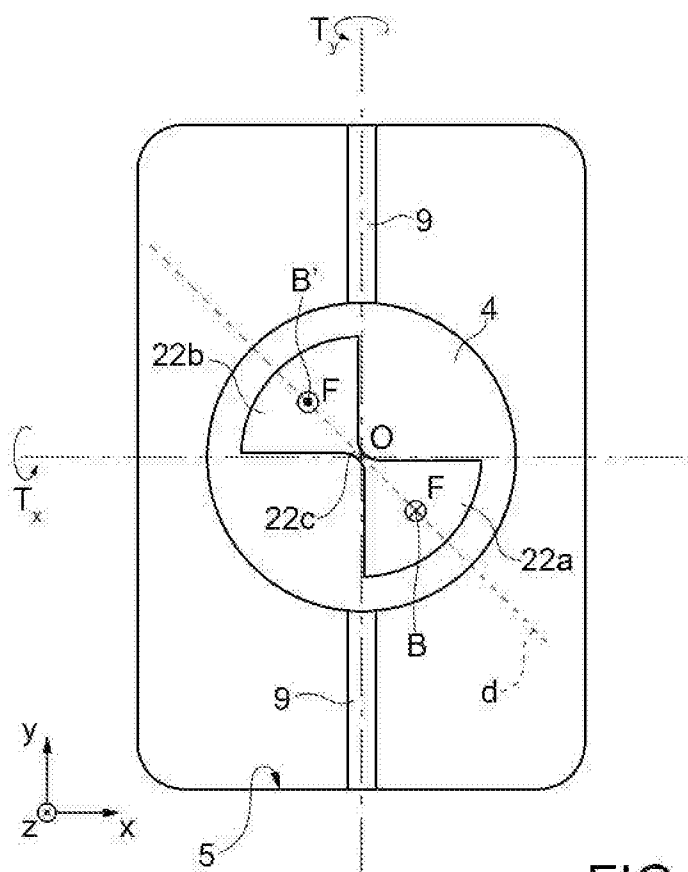


FIG. 3C

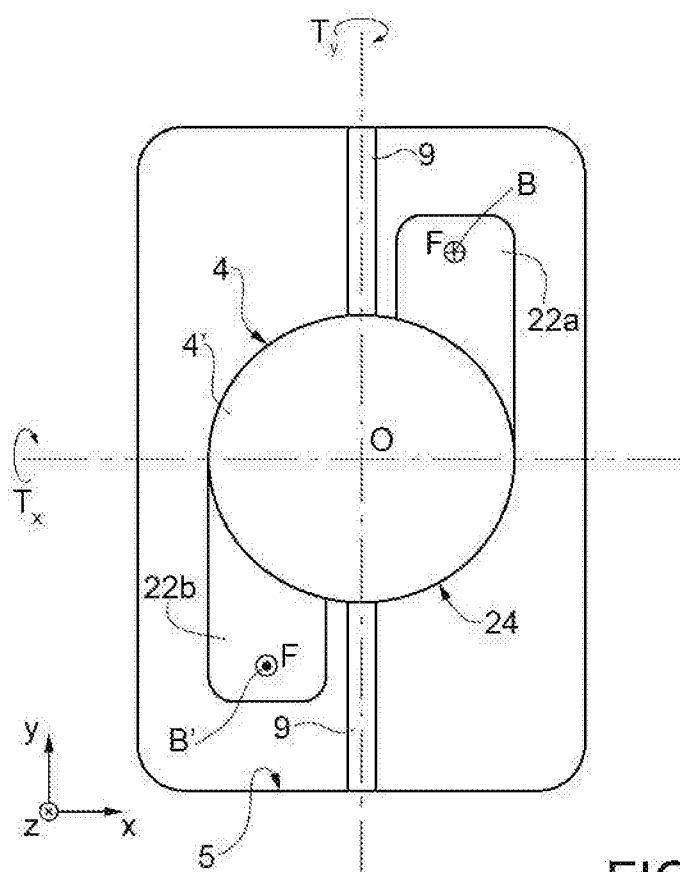


FIG. 4

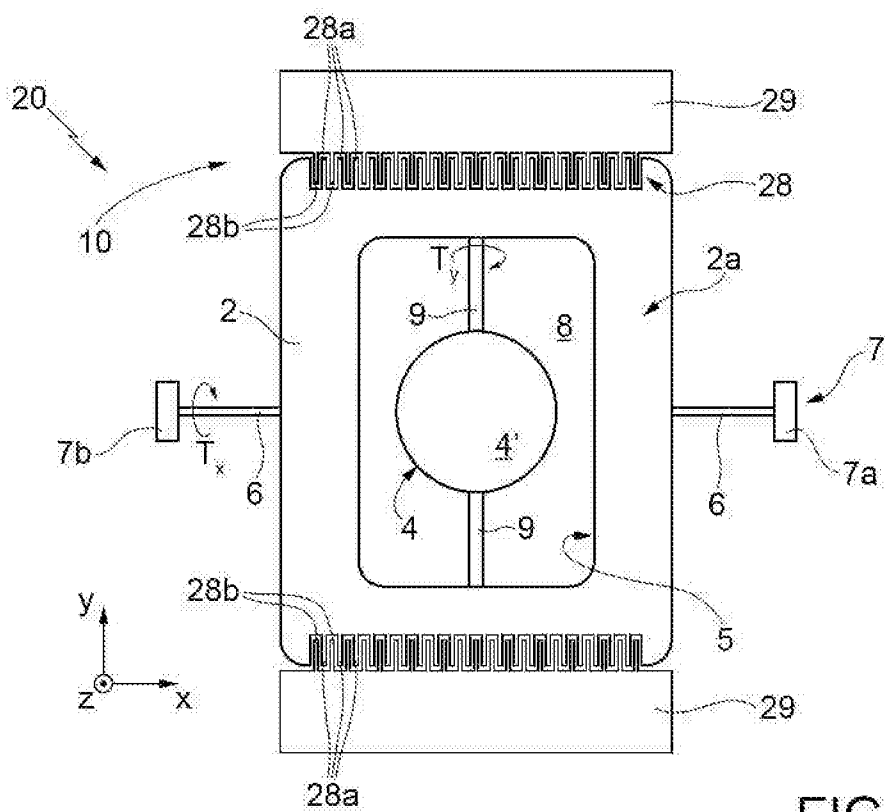


FIG. 5A

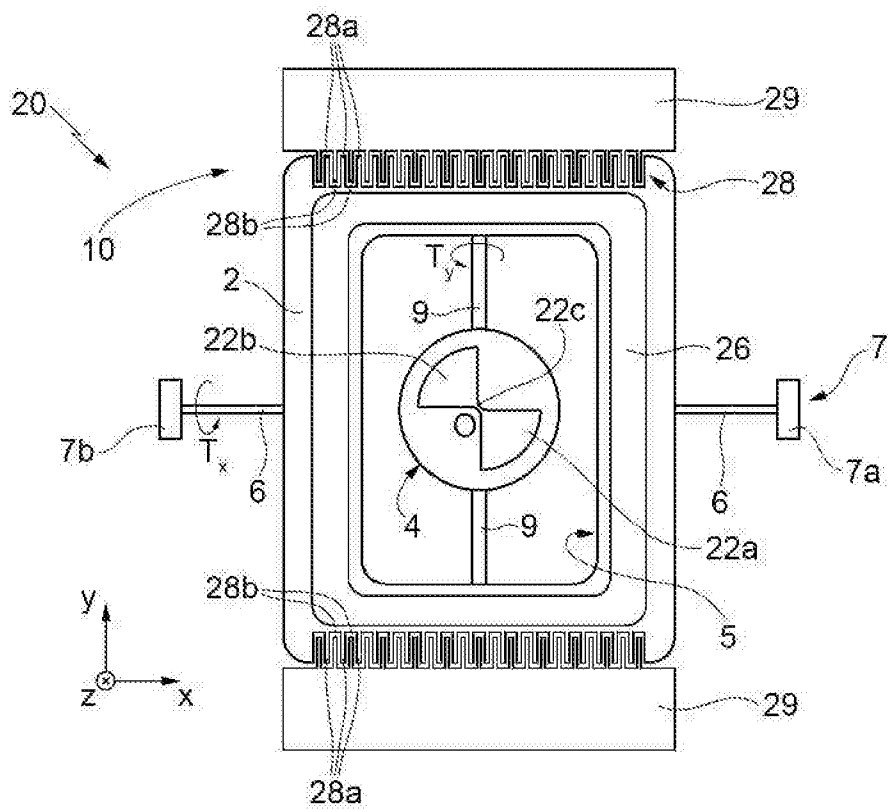


FIG. 5B

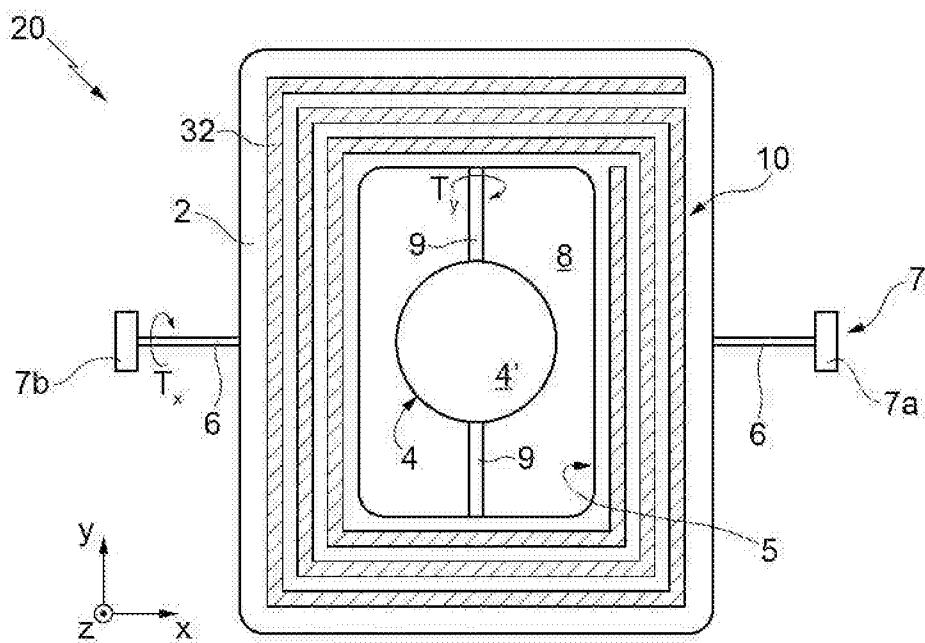


FIG. 6A

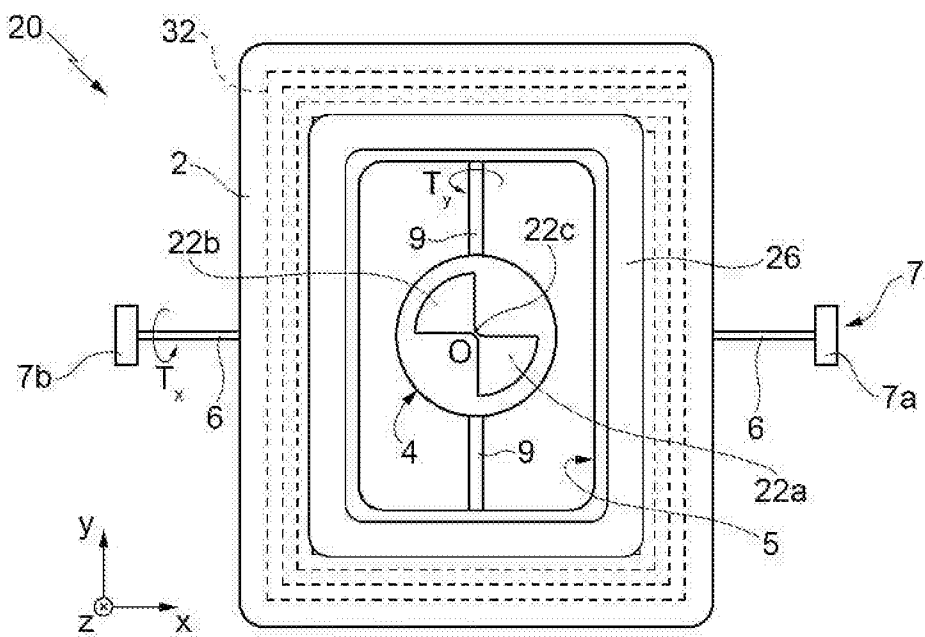


FIG. 6B

