

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102022000007121
Data Deposito	11/04/2022
Data Pubblicazione	11/10/2023

Classifiche IPC

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	02	B	26	08

Titolo

DISPOSITIVO MICROELETTROMECCANICO DI SPECCHIO AD ATTUAZIONE PIEZOELETTTRICA CON MIGLIORATA RESISTENZA ALLO STRESS
--

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:
"DISPOSITIVO MICROELETTROMECCANICO DI SPECCHIO AD ATTUAZIONE
PIEZOELETTRICA CON MIGLIORATA RESISTENZA ALLO STRESS"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI 2, 20864 AGRATE BRIANZA (MB)

Inventori: BONI Nicolò, CARMINATI Roberto, MERLI
Massimiliano, PRELINI Carlo Luigi, AFIFI AFIFI Tarek

* * *

La presente soluzione è relativa ad un dispositivo microelettromeccanico di specchio (realizzato in tecnologia MEMS - Micro-Electro-Mechanical System) ad attuazione piezoelettrica, con migliorata resistenza allo stress.

In modo noto, dispositivi microelettromeccanici di specchio vengono utilizzati in apparecchi portatili, quali ad esempio smartphone, tablet, notebook, PDA, per applicazioni ottiche, in particolare per indirizzare con modalità desiderate fasci di radiazioni luminose generati da una sorgente di luce (ad esempio laser). Grazie alle ridotte dimensioni, tali dispositivi consentono di rispettare requisiti stringenti per quanto riguarda l'occupazione di spazio, in termini di area e spessore.

Ad esempio, dispositivi microelettromeccanici di specchio vengono utilizzati in apparecchi optoelettronici,

quali proiettori miniaturizzati (cosiddetti picoproiettori), in grado di proiettare a distanza immagini e di generare pattern di luce desiderati.

I dispositivi microelettromeccanici di specchio includono generalmente una struttura orientabile che porta una opportuna superficie riflettente (o di specchio), supportata elasticamente al di sopra di una cavità e realizzata a partire da un corpo di materiale semiconduttore in modo tale da risultare mobile, ad esempio con movimento di inclinazione o rotazione al di fuori di un relativo piano di estensione principale, per indirizzare in maniera desiderata il fascio luminoso incidente.

La rotazione del dispositivo di specchio viene comandata tramite un sistema di attuazione che può essere ad esempio di tipo elettrostatico, elettromagnetico o piezoelettrico.

Sistemi di attuazione elettrostatica hanno in generale lo svantaggio di richiedere elevate tensioni operative, mentre sistemi di attuazione elettromagnetica comportano in generale un elevato consumo di potenza; è stato dunque proposto di comandare il movimento della struttura orientabile di specchio con modalità piezoelettrica.

I dispositivi di specchio con attuazione piezoelettrica presentano il vantaggio di richiedere tensioni di attuazione e consumi di potenza ridotti rispetto a dispositivi con

attuazione elettrostatica o elettromagnetica.

La Figura 1 illustra schematicamente un dispositivo microelettromeccanico di specchio di tipo noto, basato su tecnologia MEMS, indicato con 1; tale dispositivo presenta in generale la struttura descritta nella domanda di brevetto europeo EP 3 666 727 A1 a nome della stessa Richiedente.

Il dispositivo microelettromeccanico di specchio 1 è formato in una piastrina ("die") 1' di materiale semiconduttore, in particolare silicio, ed è dotato di una struttura orientabile 2, avente estensione principale in un piano orizzontale xy e disposta in modo da ruotare intorno ad un asse di rotazione X, parallelo ad un primo asse orizzontale x del suddetto piano orizzontale xy.

Il suddetto asse di rotazione rappresenta un primo asse mediano di simmetria per il dispositivo microelettromeccanico di specchio 1; un secondo asse mediano di simmetria Y per lo stesso dispositivo microelettromeccanico di specchio 1 è parallelo ad un secondo asse orizzontale y, ortogonale al primo asse orizzontale x e definente, con lo stesso primo asse orizzontale x il piano orizzontale xy.

La struttura orientabile 2 è sospesa al di sopra di una cavità 3, realizzata nella piastrina 1' e definisce una struttura portante, che porta in corrispondenza di una sua superficie superiore 2a (opposta alla stessa cavità 3) una

regione riflettente 2', ad esempio di alluminio, oppure oro, a seconda che la proiezione sia nel visibile o nell'infrarosso, in modo da definire una struttura di specchio.

La struttura orientabile 2 è accoppiata elasticamente ad una struttura fissa 4, definita nella stessa piastrina 1'. In particolare, la struttura fissa 4 forma, nel piano orizzontale xy, una cornice 4' che delimita e circonda la suddetta cavità 3 e presenta inoltre un primo ed un secondo elemento di supporto (o di ancoraggio) 5a, 5b, estendentisi longitudinalmente lungo il primo asse mediano di simmetria X all'interno della cavità 3 a partire dalla stessa cornice 4', da parti opposte della struttura orientabile 2 (lungo il primo asse orizzontale x).

La struttura orientabile 2 è supportata dal primo e dal secondo elemento di supporto 5a, 5b, a cui è accoppiata elasticamente rispettivamente mediante un primo ed un secondo elemento elastico di sospensione 6a, 6b, aventi una elevata rigidità rispetto a movimenti fuori dal piano orizzontale xy (lungo un asse ortogonale z, trasversale a tale piano orizzontale xy) e cedevoli rispetto alla torsione intorno al primo asse orizzontale x. Il primo ed il secondo elemento elastico di sospensione 6a, 6b si estendono complessivamente lungo il primo asse di rotazione X, tra il primo, rispettivamente il secondo elemento di supporto 5a,

5b ed un lato affacciato della struttura orientabile 2, a cui sono accoppiati in corrispondenza di una relativa porzione centrale. Nella forma di realizzazione illustrata, il primo ed il secondo elemento elastico di sospensione 6a, 6b sono di tipo lineare.

Il primo ed il secondo elemento elastico di sospensione 6a, 6b accoppiano la struttura orientabile 2 alla struttura fissa 4, consentendone la rotazione intorno al primo asse di rotazione X e fornendo una elevata rigidezza rispetto ai movimenti fuori dal piano, garantendo dunque un elevato rapporto tra le frequenze di movimenti spuri fuori dal piano orizzontale xy e la frequenza della rotazione intorno al primo asse di rotazione.

Il dispositivo microelettromeccanico di specchio 1 comprende inoltre una struttura di attuazione 10, accoppiata alla struttura orientabile 2 e configurata in modo da causarne la rotazione intorno al primo asse di rotazione X; la struttura di attuazione 10 è interposta tra la struttura orientabile 2 e la struttura fissa 4 e contribuisce inoltre a supportare la struttura orientabile 2 al di sopra della cavità 3.

Tale struttura di attuazione 10 comprende una prima coppia di bracci di azionamento formata da un primo e da un secondo braccio di azionamento 12a, 12b, disposti da parte opposta del, e simmetricamente rispetto al, primo asse di

rotazione X e primo elemento di supporto 5a, ed aventi estensione longitudinale parallela al primo asse orizzontale x ed al suddetto primo elemento di supporto 5a.

Nella forma di realizzazione illustrata in Figura 1, i bracci di azionamento 12a, 12b presentano una forma genericamente trapezoidale (o "a pinna"), con lato maggiore diretto parallelamente al secondo asse orizzontale y accoppiato solidalmente alla cornice 4' della struttura fissa 4 e lato minore diretto parallelamente allo stesso secondo asse orizzontale y accoppiato elasticamente alla struttura orientabile 2. Ciascun braccio di azionamento 12a, 12b presenta quindi una rispettiva prima estremità accoppiata solidalmente alla cornice 4' della struttura fissa 4 ed una rispettiva seconda estremità accoppiata meccanicamente alla struttura orientabile 2, mediante un rispettivo primo e secondo elemento elastico di azionamento 14a, 14b.

Ciascun braccio di azionamento 12a, 12b è sospeso al di sopra della cavità 3 e porta, in corrispondenza di una sua superficie superiore 12' (opposta alla stessa cavità 3) una rispettiva struttura piezoelettrica 13 (in particolare includente PZT - Piombo Zirconato di Titanio), avente ad esempio sostanzialmente la stessa estensione nel piano orizzontale xy rispetto al braccio di azionamento 12a, 12b.

Tale struttura piezoelettrica 13 (in maniera non

illustrata in dettaglio) è formata dalla sovrapposizione di una regione di elettrodo inferiore, di un opportuno materiale conduttivo, disposta al di sopra del relativo braccio di azionamento 12a, 12b; di una regione di materiale piezoelettrico (ad esempio costituita da un film sottile di PZT) disposta sulla suddetta regione di elettrodo inferiore; e di una regione di elettrodo superiore disposta sulla regione di materiale piezoelettrico.

I suddetti primo e secondo elemento elastico di azionamento 14a, 14b presentano una elevata rigidezza rispetto a movimenti fuori dal piano orizzontale xy (lungo l'asse ortogonale z) e sono cedevoli rispetto alla torsione (intorno ad un asse di rotazione parallelo al primo asse orizzontale x). Il primo ed il secondo elemento elastico di azionamento 14a, 14b si estendono tra il primo, rispettivamente il secondo braccio di azionamento 12a, 12b ed uno stesso lato affacciato della struttura orientabile 2.

Il primo ed il secondo elemento elastico di disaccoppiamento 14a, 14b sono accoppiati alla struttura orientabile 2 in corrispondenza di un rispettivo punto di accoppiamento, che si trova in prossimità del primo asse di rotazione X, ad una ridotta distanza dallo stesso primo asse di rotazione X.

Il primo ed il secondo elemento elastico di azionamento 14a, 14b sono nell'esempio di tipo ripiegato ("folded"),

ovvero sono formati da una pluralità di bracci aventi estensione longitudinale parallela al primo asse orizzontale x , collegati a due a due da elementi di raccordo aventi estensione parallela al secondo asse orizzontale y (in una differente forma di realizzazione, gli elementi elastici di disaccoppiamento 14a, 14b possono alternativamente essere di tipo lineare).

La suddetta struttura di attuazione 10 comprende inoltre una seconda coppia di bracci di azionamento formata da un terzo e da un quarto braccio di azionamento 12c, 12d, disposti da parte opposta rispetto al primo asse di rotazione X e, questa volta, del secondo elemento di supporto 5b ed aventi estensione longitudinale parallela al primo asse orizzontale x ed al suddetto secondo elemento di supporto 5b (si noti che la seconda coppia di bracci di azionamento 12c, 12d è dunque disposta in maniera simmetrica alla prima coppia di bracci di azionamento 12a, 12b rispetto al secondo asse mediano di simmetria Y).

Analogamente a quanto discusso per la prima coppia di bracci di azionamento 12a, 12b, ciascun braccio di azionamento 12c, 12d della seconda coppia porta, in corrispondenza di una sua superficie superiore 12' una rispettiva struttura piezoelettrica 13 (in particolare includente PZT - Piombo Zirconato di Titanio) e presenta una rispettiva prima estremità accoppiata solidalmente alla

cornice 4' della struttura fissa 4 ed una rispettiva seconda estremità accoppiata elasticamente alla struttura orientabile 2, mediante un rispettivo terzo e quarto elemento elastico di azionamento 14c, 14d (disposti da parte opposta del primo e secondo elemento elastico di disaccoppiamento 12a, 12b rispetto al secondo asse mediano di simmetria Y).

Come del resto illustrato nella suddetta Figura 1, anche il terzo ed il quarto elemento elastico di azionamento 14c, 14d sono accoppiati alla struttura orientabile 2 in corrispondenza di un rispettivo punto di accoppiamento, che si trova in prossimità del primo asse di rotazione X; inoltre, anche il terzo ed il quarto elemento elastico di azionamento 14c, 14d sono di tipo ripiegato ("folded").

Il dispositivo microelettromeccanico di specchio 1 comprende inoltre una pluralità di piazzole ("pad") di contatto elettrico 18, portate dalla struttura fissa 4 in corrispondenza della cornice 4', collegate elettricamente (in maniera non illustrata in dettaglio nella stessa Figura 1) alle strutture piezoelettriche 13 dei bracci di azionamento 12a-12d mediante piste elettriche di collegamento, per consentirne la polarizzazione elettrica mediante segnali elettrici provenienti dall'esterno dello stesso dispositivo microelettromeccanico di specchio 1 (ad esempio forniti da un dispositivo di polarizzazione di un apparecchio elettronico in cui il dispositivo

microelettromeccanico di specchio 1 è integrato).

Durante il funzionamento del dispositivo microelettromeccanico di specchio 1, l'applicazione di una tensione di polarizzazione alla struttura piezoelettrica 13 del primo braccio di azionamento 12a (avente valore positivo rispetto alla polarizzazione della struttura piezoelettrica 13 del secondo braccio di azionamento 12b, che può ad esempio essere collegata ad un potenziale di riferimento di massa), causa una rotazione di un angolo positivo intorno al primo asse di rotazione X. In maniera corrispondente, l'applicazione di una tensione di polarizzazione alla struttura piezoelettrica 13 del secondo braccio di azionamento 12b (avente valore positivo rispetto alla polarizzazione della struttura piezoelettrica 13 del primo braccio di azionamento 12a), causa una corrispondente rotazione di un angolo negativo intorno allo stesso primo asse di rotazione X.

Si noti che la stessa tensione di polarizzazione può essere vantaggiosamente applicata alla struttura piezoelettrica 13 sia del primo braccio di azionamento 12a sia del terzo braccio di azionamento 12c, e, analogamente, per causare la rotazione opposta, alla struttura piezoelettrica 13 sia del secondo braccio di azionamento 12b sia del quarto braccio di azionamento 12d, in modo da contribuire in maniera corrispondente alla rotazione della

struttura orientabile 2 intorno al primo asse di rotazione X (come del resto risulterà evidente dalla descrizione precedente).

La struttura orientabile 2 può raggiungere in tal modo elevati angoli di apertura (ad esempio compresi tra 8° e 12°) a fronte di un ridotto valore della tensione di polarizzazione (ad esempio < 40 V).

Gli elementi elastici di azionamento 14a-14d disaccoppiano elasticamente lo spostamento per effetto piezoelettrico dei bracci di azionamento 12a-12d lungo l'asse ortogonale z dalla conseguente rotazione della struttura orientabile 2 lungo il primo asse di rotazione.

Tali elementi elastici di azionamento 14a-14d presentano una configurazione sottile ed allungata al fine di ridurre la rigidità torsionale e sono soggetti, in maniera che risulterà evidente, ad uno stress meccanico che aumenta all'aumentare degli angoli di apertura della struttura orientabile 2.

A questo riguardo, è nota la generale richiesta di ridurre le dimensioni dei dispositivi microelettromeccanici di specchio, al fine di ottenere una maggiore miniaturizzazione dei risultanti dispositivi optoelettronici.

In particolare, un aumento dell'efficienza delle suddette strutture piezoelettriche 13, ad esempio mediante

l'utilizzo di tecniche di deposizione da fase vapore (PVD) multistrato dei relativi materiali piezoelettrici, può consentire una riduzione della superficie occupata dalla struttura di attuazione 10 e, di conseguenza, dell'area occupata della piastrina 1' del dispositivo microelettromeccanico di specchio 1.

Ad esempio, la presente Richiedente ha verificato la possibilità di ridurre anche del 20% l'occupazione di area da parte della suddetta piastrina 1', a parità di prestazioni ottiche.

La stessa Richiedente ha tuttavia constatato che alla riduzione dell'occupazione di area e/o al suddetto aumento dell'efficienza delle strutture piezoelettriche 13 si accompagna in generale un incremento dello stress meccanico a cui sono sottoposti gli elementi elastici di azionamento 14a-14b; ad esempio, tale incremento può arrivare anche al 20% nel suddetto esempio di riduzione dell'occupazione d'area della piastrina 1'.

Esiste dunque la possibilità che si verifichino danneggiamenti o rotture degli stessi elementi elastici di azionamento 14a-14b ed in ogni caso le suddette considerazioni pongono dei vincoli per il dimensionamento di tali elementi elastici di azionamento 14a-14b ed in generale per la riduzione delle dimensioni della piastrina 1'oltre ad un certo valore.

Scopo della presente soluzione è dunque quello di fornire un dispositivo microelettromeccanico di specchio che consenta di superare le problematiche precedentemente evidenziate.

Secondo la presente soluzione viene fornito un dispositivo microelettromeccanico di specchio, come definito nelle rivendicazioni allegate.

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

- la Figura 1 mostra una vista schematica in pianta di un dispositivo microelettromeccanico di specchio di tipo noto;

- la Figura 2 è una vista in pianta schematica e semplificata di un dispositivo microelettromeccanico di specchio, secondo una forma di realizzazione della presente soluzione;

- la Figura 3 è una sezione schematica e semplificata presa lungo la linea di sezione III-III del dispositivo microelettromeccanico di specchio di Figura 2;

- le Figure 4A-4C mostrano in maniera semplificata fasi successive di un procedimento di fabbricazione esemplificativo di una disposizione di magneti nel dispositivo microelettromeccanico di specchio;

- le Figure 5-6 sono viste in pianta schematiche e semplificate di un dispositivo microelettromeccanico di specchio, secondo ulteriori forme di realizzazione della presente soluzione; e

- la Figura 7 è uno schema a blocchi di massima di un apparecchio optoelettronico, ad esempio un picoproiettore, utilizzante il dispositivo microelettronico di specchio.

Come sarà descritto in dettaglio in seguito, un aspetto della presente soluzione prevede di sostituire l'accoppiamento meccanico di natura elastica tra la struttura di attuazione e la struttura orientabile del dispositivo microelettromeccanico di specchio (implementato nelle soluzioni note dagli elementi elastici di azionamento 14a-14d, si veda la suddetta Figura 1 e la precedente discussione), mediante un accoppiamento di natura magnetica.

La forza di azionamento viene dunque trasmessa dai bracci di azionamento della struttura di attuazione alla struttura orientabile mediante una forza di interazione magnetica, senza alcun tipo di accoppiamento meccanico, in particolare di tipo elastico.

L'utilizzo di tale accoppiamento magnetico consente quindi di evitare i discussi problemi di dimensionamento e le eventuali rotture o danneggiamenti degli elementi elastici di azionamento (che non sono in tal caso presenti nel dispositivo microelettromeccanico di specchio).

La Figura 2 mostra in maniera schematica un dispositivo microelettromeccanico di specchio secondo una possibile forma di realizzazione della presente soluzione, indicato in generale con 20.

Tale dispositivo microelettromeccanico di specchio 20 presenta in generale una struttura ed una configurazione analoga al dispositivo descritto con riferimento alla Figura 1 e comprende quindi:

la struttura orientabile 2, portante superiormente, al di sopra della relativa superficie superiore 2a, la regione riflettente 2', sospesa all'interno della cavità 3 definita dalla cornice 4' della struttura fissa 4 ed accoppiata elasticamente al primo ed al secondo elemento di supporto 5a, 5b della stessa struttura fissa 4 mediante il primo ed il secondo elemento elastico di sospensione 6a, 6b (che accoppiano la struttura orientabile 2 alla struttura fissa 4, consentendone la rotazione intorno all'asse di rotazione X fornendo una elevata rigidezza rispetto ai movimenti fuori dal piano orizzontale xy); e

la struttura di attuazione 10, interposta tra la cornice 4' della struttura fissa 4 e la struttura orientabile 2 e configurata in modo da azionare in rotazione intorno all'asse di rotazione X la stessa struttura orientabile 2.

A differenza di quanto descritto in precedenza con riferimento alla suddetta Figura 1, la struttura di

attuazione 10 in questo caso non è accoppiata meccanicamente alla struttura orientabile 2 e non contribuisce a supportare la stessa struttura orientabile 2 al di sopra della cavità 3.

Tale struttura di attuazione 10 comprende anche in questo caso la prima coppia di bracci di azionamento formata dal primo e dal secondo braccio di azionamento 12a, 12b, che sono qui sospesi a sbalzo al di sopra della cavità 3 (in configurazione a "cantilever"), essendo accoppiati solidalmente alla cornice 4' della struttura fissa 4 in corrispondenza della loro prima estremità (lato maggiore) ed avendo la seconda estremità (lato minore) libera, disaccoppiata meccanicamente rispetto alla struttura orientabile 2, essendo affacciata alla stessa struttura orientabile 2 ad una certa distanza di separazione (gap).

Anche in questo caso, i suddetti primo e secondo braccio di azionamento 12a, 12b portano la rispettiva struttura piezoelettrica 13 in corrispondenza della rispettiva superficie superiore 12' e sono disposti da parte opposta del, e simmetricamente rispetto al primo asse di rotazione X ed al primo elemento di supporto 5a, e presentano estensione longitudinale parallela al primo asse orizzontale x ed al suddetto primo elemento di supporto 5a.

La stessa struttura di attuazione 10 comprende inoltre la seconda coppia di bracci di azionamento formata dal terzo

e dal quarto braccio di azionamento 12c, 12d, disposti da parte opposta rispetto al primo asse di rotazione X e del secondo elemento di supporto 5b ed aventi estensione longitudinale parallela al primo asse orizzontale x ed al suddetto secondo elemento di supporto 5b (in maniera simmetrica rispetto alla prima coppia di bracci di azionamento 12a, 12b rispetto al secondo asse mediano di simmetria Y).

I bracci di azionamento 12c-12d della seconda coppia sono anch'essi sospesi a sbalzo al di sopra della cavità 3 e portano, in corrispondenza della rispettiva superficie superiore 12' la rispettiva struttura piezoelettrica 13.

Secondo un aspetto della presente soluzione, ciascun braccio di azionamento 12a-12d è in questo caso accoppiato magneticamente alla struttura orientabile 2, in corrispondenza della rispettiva seconda estremità.

A tal fine, ciascun braccio di azionamento 12a-12d porta inferiormente, in corrispondenza di una relativa superficie inferiore 12" (si veda anche la successiva Figura 3), opposta alla superficie superiore 12' che porta la rispettiva struttura piezoelettrica 13, una prima disposizione di magnete 22.

Ad esempio, la prima disposizione di magnete 22 può comprendere un rispettivo magnete 22' avente una conformazione sostanzialmente a parallelepipedo, accoppiato

solidalmente al rispettivo braccio di azionamento 12a-12d ed estendentesi verticalmente a partire dalla stessa superficie inferiore 12" verso la cavità 3.

Inoltre, la struttura orientabile 2 porta, in corrispondenza di una superficie inferiore 2b (opposta alla superficie superiore 2a portante la superficie riflettente 2') una seconda disposizione di magnete 24.

Ad esempio, anche tale seconda disposizione di magnete 24 comprende un rispettivo magnete 24' avente una conformazione sostanzialmente a parallelepipedo, estendentesi verticalmente a partire dalla stessa superficie inferiore 2b verso la cavità 3.

In particolare, la prima e la seconda disposizione di magnete 22, 24 sono disposte in posizione affacciata nel piano orizzontale xy, ad una certa distanza di separazione (gap).

Il valore di tale distanza di separazione dipende da un compromesso tra un valore minimo definito da vincoli di layout ed un valore massimo determinato in base alla diminuzione del campo magnetico e della risultante forza di accoppiamento; ad esempio, tale distanza di separazione può essere compresa tra 50 μm e 100 μm , essendo preferibilmente pari a 50 μm .

Ciascuna prima e seconda disposizione di magnete 22, 24, tra loro affacciate, formano in tal modo una rispettiva

coppia magnetica 25, che è così associata a ciascun braccio di azionamento 12a-12d della struttura di attuazione 10.

In particolare, ciascuna coppia magnetica 25 è configurata, per effetto di una relativa polarizzazione magnetica, in modo da implementare una forza magnetica di attrazione tra le rispettive prima e seconda disposizione di magneti 22, 24 (e dunque tra il rispettivo braccio di azionamento 12a-12d e la struttura orientabile 2).

In uso, uno spostamento verticale (lungo il suddetto asse ortogonale z) di ciascun braccio di azionamento 12a-12d in seguito alla polarizzazione elettrica della relativa struttura piezoelettrica 13 causa dunque un corrispondente spostamento verticale della struttura orientabile 2, per effetto della forza di interazione magnetica esercitata dalla rispettiva coppia magnetica 25, che trasferisce la forza di attuazione piezoelettrica dallo stesso braccio di azionamento 12a-12d alla struttura orientabile 2.

Simulazioni svolte dalla Richiedente hanno dimostrato la possibilità di ottenere tramite tale interazione magnetica forze di azionamento della struttura orientabile 2 del tutto comparabili con le forze elastiche ottenibili con soluzioni tradizionali (si veda ad esempio la Figura 1, con la presenza degli elementi elastici di azionamento 14a-14d).

In maggiore dettaglio, durante il funzionamento del

dispositivo microelettromeccanico 20, l'applicazione di una tensione di polarizzazione alla struttura piezoelettrica 13 del primo braccio di azionamento 12a (avente valore positivo rispetto alla polarizzazione della struttura piezoelettrica 13 del secondo braccio di azionamento 12b, che può ad esempio essere collegata ad un potenziale di riferimento di massa), causa una rotazione della struttura orientabile 2 di un angolo positivo intorno all'asse di rotazione X, grazie al suddetto accoppiamento magnetico implementato dalla rispettiva coppia magnetica 25.

In maniera corrispondente, l'applicazione di una tensione di polarizzazione alla struttura piezoelettrica 13 del secondo braccio di azionamento 12b (avente valore positivo rispetto alla polarizzazione della struttura piezoelettrica 13 del primo braccio di azionamento 12a), causa una corrispondente rotazione della struttura di polarizzazione 2 di un angolo negativo intorno allo stesso asse di rotazione X.

La stessa tensione di polarizzazione può vantaggiosamente essere applicata alle strutture piezoelettriche 13 sia del primo braccio di azionamento 12a sia del terzo braccio di azionamento 12c, e, analogamente, per causare la rotazione opposta, alle strutture piezoelettriche 13 sia del secondo braccio di azionamento 12b sia del quarto braccio di azionamento 12d, in modo da

contribuire in maniera corrispondente alla rotazione della struttura orientabile 2 intorno all'asse di rotazione X.

La Figura 3 mostra una sezione trasversale schematica del suddetto dispositivo microelettromeccanico di specchio 20.

In particolare, tale sezione (parallela al primo asse orizzontale x) evidenzia come lo spessore (lungo l'asse ortogonale z) dei bracci di azionamento 12a-12d (e, in maniera non illustrata, anche degli elementi elastici di sospensione 6a, 6b) corrisponda allo spessore della struttura orientabile 2, ad esempio essendo pari a 20 μm , tale spessore essendo richiamato in seguito come primo spessore t_1 (i suddetti elementi sono formati in sostanza sul fronte della piastrina 1').

Al di sotto della stessa struttura orientabile 2, è accoppiata inoltre una struttura di rinforzo 28, avente funzione di rinforzo meccanico per la stessa struttura orientabile 2 (ed inoltre atta a garantirne la planarità, "flatness", nel piano orizzontale xy, in condizioni di riposo), che presenta un secondo spessore t_2 lungo l'asse ortogonale z, maggiore del primo spessore, ad esempio essendo pari a 140 μm ; la struttura di rinforzo 28 può avere ad esempio (come mostrato in Figura 2) una conformazione ad anello ed essere disposta in corrispondenza della periferia della struttura orientabile 2 (tale struttura di rinforzo 21

è formata in sostanza sul retro della piastrina 1').

La struttura fissa 4 del dispositivo microelettromeccanico 2 (in particolare, la relativa cornice 4') presenta lungo l'asse ortogonale z uno spessore sostanzialmente pari alla somma dei suddetti primo e secondo spessore t_1 , t_2 .

Come mostrato nella stessa Figura 3, un corpo di base 29 è accoppiato al di sotto della struttura fissa 4 e presenta, al di sotto della cavità 3 ed in corrispondenza della struttura mobile 2, un recesso 29', per consentire la rotazione della stessa struttura mobile 2. In particolare, la cornice 4' è accoppiata a tale corpo di supporto 29 mediante opportune regioni di materiale di accoppiamento (bonding) 30.

La prima e la seconda disposizione di magneti 22, 24 sono accoppiate al di sotto del relativo braccio di azionamento (in Figura 3, sono mostrati a titolo di esempio il primo ed il terzo braccio di azionamento 12a, 12c) e, rispettivamente, al di sotto della struttura orientabile 2, essendo realizzate sul retro della piastrina 1'.

Nella forma di realizzazione illustrata in Figura 3, le suddette prima e seconda disposizione di magneti 22, 24 comprendono un rispettivo magnete 22', 24' avente un terzo spessore t_3 lungo l'asse ortogonale z , compreso tra il primo spessore t_1 ed il secondo spessore t_2 , pari ad esempio a 100

um, ed accoppiato al relativo braccio di azionamento 12a, 12c e, rispettivamente, alla struttura orientabile 2, mediante una porzione di raccordo 34, di materiale semiconduttore.

Tale porzione di raccordo 34 risulta dunque interposta, nel caso della prima disposizione di magnete 22, tra la superficie inferiore 12" del rispettivo braccio di azionamento 12a, 12c ed il rispettivo magnete 22'; e, nel caso della seconda disposizione di magnete 24, tra la superficie inferiore 2b della struttura orientabile 2 ed il rispettivo magnete 24'.

Vantaggiosamente, la prima e la seconda disposizione di magnete 22, 24 possono essere realizzate con tecniche di fabbricazione compatibili con i procedimenti di fabbricazione delle strutture MEMS che vengono utilizzati per la realizzazione del dispositivo microelettromeccanico di specchio 20 a partire dalla piastrina 1'.

Ad esempio, tali prima e seconda disposizione di magnete 22, 24 possono essere realizzate con una tecnica basata sull'agglomerazione di polveri di materiale magnetico di dimensioni micrometriche mediante deposizione di strati atomici (ALD - Atomic Layer Deposition); materiali utilizzabili allo scopo possono ad esempio includere polveri sinterizzate al Neodimio, NdFeB, Samario Cobalto, SmCo, oppure Ferro, Fe.

Come mostrato schematicamente in Figura 4A, tale tecnica può prevedere la formazione, mediante lavorazione dal retro della piastrina 1' (qui mostrata capovolta) di pareti verticali 40 definenti tra loro una o più microcavità 42, in particolare in corrispondenza della seconda estremità dei bracci di azionamento 12a-12d ed inoltre delle porzioni affacciate della struttura orientabile 2 (qui non mostrati per semplicità di illustrazione).

In seguito, Figura 4B, tali microcavità 42 possono essere riempite di polveri 44 di opportuno materiale magnetico.

Quindi, Figura 4C, tale materiale viene sottoposto ad un processo di deposizione ALD per la sua solidificazione all'interno delle microcavità 42; il materiale solidificato viene in seguito sottoposto ad un campo magnetico per causarne la polarizzazione magnetica così da definire la prima e la seconda disposizione di magnete 22, 24 ed i relativi magneti 22', 24'.

In modo non illustrato, le pareti verticali 40 possono essere rimosse in modo da lasciare solamente le suddette prima e seconda disposizione di magnete 22, 24 sul retro della piastrina 1'.

La Figura 5 mostra una possibile ulteriore forma di realizzazione del dispositivo microelettromeccanico di specchio 20, che si differenzia per la presenza di una

configurazione interdigitata della prima e seconda disposizione di magneti 22, 24 associate a ciascun braccio di azionamento 12a-12d ed alla struttura orientabile 2.

In particolare, in questo caso alla struttura orientabile 2 sono accoppiati elementi di estensione 50, uno per ciascun braccio di azionamento 12a-12d; in maniera non illustrata nella suddetta Figura 5, tali elementi di estensione 50 hanno ad esempio il suddetto primo spessore t_1 lungo l'asse ortogonale z .

Ciascun elemento di estensione 50 si estende a partire dalla struttura orientabile 2 verso il rispettivo braccio di azionamento 12a-12d, nell'esempio lungo il primo asse orizzontale x ed è configurato in modo da portare inferiormente, in corrispondenza di una estremità distale rispetto alla stessa struttura orientabile 2, la seconda disposizione di magneti 24, qui comprendente un rispettivo magnete 24'.

Nella forma di realizzazione mostrata in Figura 5, la suddetta estremità distale dell'elemento di estensione 50 si inserisce all'interno di una apertura 52 realizzata nella seconda estremità del rispettivo braccio di azionamento 12a-12d. La prima disposizione di magneti 22 comprende in questo caso una coppia di magneti 22' disposti lateralmente (lungo il secondo asse orizzontale y) rispetto alla suddetta apertura 52 ed al rispettivo magnete 24' della seconda

disposizione di magneti 24, per una risultante configurazione interdigitata degli stessi magneti 22', 24'.

In una ulteriore forma di realizzazione, illustrata in Figura 6, la suddetta estremità distale dell'elemento di estensione 50 ha una conformazione a dita 50' (nell'esempio in numero pari a due), ciascuna delle quali si estende trasversalmente rispetto allo stesso elemento di estensione 50 (lungo il secondo asse orizzontale y) e porta inferiormente un rispettivo magnete 24' della seconda disposizione di magneti 24. In questo caso, una pluralità di aperture 52 sono realizzate nella seconda estremità del rispettivo braccio di azionamento 12a-12d per alloggiare le suddette dita 50' dell'elemento di estensione 50.

Analogamente, la seconda estremità del rispettivo braccio di azionamento 12a-12d, avente qui un'estensione principale lungo il secondo asse orizzontale y, ha una corrispondente conformazione a dita 56 (nell'esempio in numero pari a tre), ciascuna portante inferiormente un rispettivo magnete 22' della prima disposizione di magneti 22, per la risultante configurazione interdigitata degli stessi magneti 22', 24'.

La configurazione interdigitata della prima e seconda disposizione di magneti 22, 24 consente in generale di ottenere un incremento della risultante forza di accoppiamento magnetica finalizzata all'azionamento della

struttura orientabile 2 del dispositivo microelettromeccanico di specchio 20 da parte della struttura di attuazione 10.

Come illustrato schematicamente in Figura 7, Il dispositivo microelettromeccanico di specchio 20 può essere vantaggiosamente utilizzato in un dispositivo optoelettronico, quale un picoproiettore, 60, atto ad esempio ad essere accoppiato funzionalmente ad un apparecchio elettronico portatile 61 (quale uno smartphone o un occhiale a realtà aumentata).

In dettaglio, il dispositivo optoelettronico 60 comprende una sorgente luminosa 62, ad esempio di tipo laser, atta a generare un fascio luminoso 63; il dispositivo microelettronico di specchio 20, agente da specchio ed atto a ricevere il fascio luminoso 63 e ad indirizzarlo verso uno schermo o superficie di visualizzazione 65 (esterna e posta a distanza dallo stesso pico-proiettore 60); un primo circuito di pilotaggio 66, atto a fornire opportuni segnali di comando alla sorgente luminosa 62, per la generazione del fascio luminoso 63, in funzione di un'immagine da proiettare; un secondo circuito di pilotaggio 68, atto a fornire opportuni segnali di comando alla struttura di attuazione 10 del dispositivo microelettronico di specchio 20; ed un'interfaccia 69, atta a ricevere, da un'unità di controllo 70, in questo caso esterna, ad esempio inclusa

nell'apparecchio portatile 61, primi segnali di controllo S_{d1} , per controllare il primo circuito di pilotaggio 66, e secondi segnali di controllo S_{d2} , per controllare il secondo circuito di pilotaggio 68.

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

In ogni caso, si evidenzia nuovamente che la soluzione descritta per l'azionamento della struttura orientabile 2 mediante accoppiamento magnetico consente di incrementare la resistenza allo stress del dispositivo microelettromeccanico di specchio 20, evitandone possibili rotture o danneggiamenti.

La struttura di attuazione 10 risulta infatti disaccoppiata meccanicamente rispetto alla struttura orientabile 2.

In particolare, grazie all'assenza degli elementi di accoppiamento elastico tra la struttura di attuazione 10 e la struttura orientabile 2, risulta possibile ridurre la dimensione della piastrina 1' e/o incrementare l'efficienza delle strutture piezoelettriche 13 della stessa struttura di attuazione 10 senza dover raggiungere un compromesso con la resistenza allo stress degli stessi elementi di accoppiamento elastico (qui non presenti e sostituiti, appunto, dall'interazione magnetica).

In generale, la presente soluzione consente di

sfruttare i vantaggi dell'attuazione piezoelettrica (ovvero, l'impiego di ridotte tensioni di polarizzazione con un ridotto consumo energetico per ottenere elevati spostamenti) e del rilevamento piezoresistivo dell'attuazione dello specchio, al contempo presentando migliorate prestazioni meccaniche ed elettriche rispetto a soluzioni note.

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

Ad esempio, la soluzione descritta può essere applicata anche nel caso di una realizzazione biassiale del dispositivo microelettromeccanico di specchio (in maniera analoga a quanto descritto in dettaglio nella suddetta domanda di brevetto europeo 3 666 727 A1), ovvero nel caso in cui la struttura orientabile 2 sia in grado di compiere movimenti di rotazione sia intorno ad un primo asse di rotazione (coincidente con il primo asse di rotazione X parallelo al primo asse orizzontale x), sia intorno ad un secondo asse di rotazione (coincidente con il secondo asse mediano di simmetria Y parallelo al secondo asse orizzontale y).

Inoltre, possono in generale essere previste varianti per quanto riguarda la forma degli elementi costitutivi il dispositivo microelettromeccanico di specchio 20 ad esempio forme differenti della struttura orientabile 2 (e della

relativa regione riflettente 2'), o forme e/o disposizioni differenti dei bracci di azionamento 12a-12d.

Inoltre, il primo ed il secondo elemento elastico di sospensione 6a, 6b potrebbero essere, anziché di tipo lineare, alternativamente di tipo "folded" o ripiegato.

In maniera non illustrata in dettaglio, le suddette prima e seconda disposizione di magneti 22, 24 possono comprendere inoltre una pluralità di rispettivi magneti 22', 24' disposti a matrice o griglia, destinati congiuntamente a realizzare l'accoppiamento magnetico tra i rispettivi bracci di azionamento 12a-12d e la struttura orientabile 2.

Inoltre, in maniera di per sé nota, possono essere previste differenti tipologie di movimento per la struttura orientabile 2, ad esempio con modalità di tipo quasi-statico o risonante.

RIVENDICAZIONI

1. Dispositivo microelettromeccanico di specchio (20), comprendente, in una piastrina (1') di materiale semiconduttore:

una struttura fissa (4) definente una cavità (3);

una struttura orientabile (2) portante una regione riflettente (2'), sospesa elasticamente al di sopra della cavità (3) ed avente estensione principale in un piano orizzontale (xy);

almeno una prima coppia di bracci di azionamento (12a, 12b), portanti rispettive strutture piezoelettriche (13) polarizzabili per generare una forza di azionamento tale da causare una rotazione della struttura orientabile (2) intorno ad un asse di rotazione (X) parallelo ad un primo asse orizzontale (x) di detto piano orizzontale (xy);

elementi elastici di sospensione (6a, 6b), configurati in modo da accoppiare detta struttura orientabile (2) elasticamente a detta struttura fissa (4) in corrispondenza di detto asse di rotazione (X), rigidi rispetto a movimenti fuori dal piano orizzontale (xy) e cedevoli rispetto a torsione intorno a detto asse di rotazione (X);

caratterizzato dal fatto che i bracci di azionamento (12a, 12b) di detta prima coppia sono accoppiati magneticamente a detta struttura orientabile (2) per causarne la rotazione intorno all'asse di rotazione (X)

mediante interazione magnetica, in seguito alla polarizzazione delle rispettive strutture piezoelettriche (13).

2. Dispositivo secondo la rivendicazione 1, in cui ciascuno di detti bracci di azionamento (12a, 12b) è sospeso a sbalzo al di sopra di detta cavità (3) e presenta una prima estremità accoppiata solidalmente a detta struttura fissa (4) ed una seconda estremità affacciata a distanza a detta struttura orientabile (2), essendo disaccoppiata meccanicamente da detta struttura orientabile (2).

3. Dispositivo secondo la rivendicazione 2, in cui ciascuno di detti bracci di azionamento (12a, 12b) porta una rispettiva prima disposizione di magnete (22) e a detta struttura orientabile (2) è accoppiata una rispettiva seconda disposizione di magnete (24) per ciascuna prima disposizione di magnete (22); ciascuna prima disposizione di magnete (22) essendo accoppiata magneticamente ad una rispettiva seconda disposizione di magnete (24) per creare una forza di interazione magnetica atta a trasferire la forza di azionamento generata dal rispettivo braccio di azionamento (12a, 12b) a detta struttura orientabile (2).

4. Dispositivo secondo la rivendicazione 3, in cui detta forza di interazione magnetica è una forza di attrazione magnetica.

5. Dispositivo secondo la rivendicazione 3 o 4, in cui

detta prima disposizione di magnete (22) comprende almeno un rispettivo magnete (22'), accoppiato ad una superficie inferiore (12'') del rispettivo braccio di azionamento (12a, 12b), affacciata a detta cavità (3); e detta seconda disposizione di magnete (24) comprende almeno un rispettivo magnete (24'), accoppiato ad una rispettiva superficie inferiore (2b) di detta struttura orientabile (2), in posizione affacciata nel piano orizzontale (xy) a detto rispettivo magnete (22') di detta prima disposizione di magnete (22).

6. Dispositivo secondo la rivendicazione 5, in cui detti bracci di azionamento (12a, 12b) portano la rispettiva struttura piezoelettrica (13) al di sopra di una superficie superiore (12'), opposta a detta superficie inferiore (12'').

7. Dispositivo secondo la rivendicazione 3 o 4, in cui dette prima e seconda disposizione di magnete (22, 24) presentano una configurazione interdigitata.

8. Dispositivo secondo la rivendicazione 7, comprendente inoltre elementi di estensione (50) accoppiati a detta struttura orientabile (2), uno per ciascuno di detti bracci di azionamento (12a, 12b); ciascuno di detti elementi di estensione (50) estendendosi a partire dalla struttura orientabile (2) verso un rispettivo braccio di azionamento (12a, 12b) e configurato in modo da portare inferiormente, in corrispondenza di una estremità distale rispetto alla

struttura orientabile (2), un rispettivo magnete (24') della rispettiva seconda disposizione di magnete (24).

9. Dispositivo secondo la rivendicazione 8, in cui detta estremità distale dell'elemento di estensione (50) è disposta all'interno di una apertura (52) realizzata nella seconda estremità del rispettivo braccio di azionamento (12a, 12b); in cui detta prima disposizione di magnete (22) comprende una coppia di magneti (22') disposti lateralmente rispetto al rispettivo magnete (24') della seconda disposizione di magnete (24), per una risultante configurazione interdigitata di detti magneti (22', 24').

10. Dispositivo secondo la rivendicazione 8, in cui detta estremità distale dell'elemento di estensione (50) ha una conformazione a dita (50'), ciascuna delle quali si estende trasversalmente rispetto all'elemento di estensione (50) e porta inferiormente un rispettivo magnete (24') della seconda disposizione di magnete (24); in cui la seconda estremità del rispettivo braccio di azionamento (12a, 12b) ha una corrispondente conformazione a dita (56), ciascuna delle quali porta inferiormente un rispettivo magnete (22') della prima disposizione di magnete (22), per una risultante configurazione interdigitata di detti magneti (22', 24').

11. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detta struttura fissa (4) forma, nel piano orizzontale (xy), una cornice (4') che

delimita e circonda detta cavità (3), e presenta inoltre un primo ed un secondo elemento di supporto (5a, 5b), estendentisi longitudinalmente lungo detto asse di rotazione (X) all'interno della cavità (3) a partire da detta cornice (4'), da parti opposte di detta struttura orientabile (2); in cui detti elementi elastici di sospensione (6a, 6b) si estendono tra detta struttura orientabile (2) ed un rispettivo di detti primo e secondo elemento di supporto (5a, 5b).

12. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre una seconda coppia di bracci di azionamento (12c, 12d), accoppiati alla struttura orientabile (2) e portanti rispettive strutture piezoelettriche (13) polarizzabili per generare una forza di azionamento tale da causare una rotazione della struttura orientabile (2) intorno a detto asse di rotazione (X); i bracci di azionamento (12c, 12d) di detta seconda coppia essendo disposti da parte opposta ai bracci di azionamento (12a, 12b) di detta prima coppia rispetto ad un secondo asse orizzontale (y) di detto piano orizzontale, ortogonale a detto primo asse orizzontale (x).

13. Procedimento di fabbricazione di un dispositivo microelettromeccanico di specchio (20), comprendente formare, in una piastrina (1') di materiale semiconduttore:
una struttura fissa (4) definente una cavità (3);

una struttura orientabile (2) portante una regione riflettente (2'), sospesa elasticamente al di sopra della cavità (3) ed avente estensione principale in un piano orizzontale (xy);

almeno una prima coppia di bracci di azionamento (12a, 12b), portanti rispettive strutture piezoelettriche (13) polarizzabili per generare una forza di azionamento tale da causare una rotazione della struttura orientabile (2) intorno ad un asse di rotazione (X) parallelo ad un primo asse orizzontale (x) di detto piano orizzontale (xy); ed

elementi elastici di sospensione (6a, 6b), configurati in modo da accoppiare detta struttura orientabile (2) elasticamente a detta struttura fissa (4) in corrispondenza di detto asse di rotazione (X), rigidi rispetto a movimenti fuori dal piano orizzontale (xy) e cedevoli rispetto a torsione intorno a detto asse di rotazione (X),

caratterizzato dal fatto di comprendere accoppiare magneticamente detta prima coppia di bracci di azionamento (12a, 12b) a detta struttura orientabile (2) per causarne la rotazione intorno all'asse di rotazione (X) mediante interazione magnetica, in seguito alla polarizzazione delle rispettive strutture piezoelettriche (13).

14. Procedimento secondo la rivendicazione 13, in cui accoppiare magneticamente comprende formare una rispettiva prima disposizione di magnete (22) portata da ciascun braccio

di azionamento (12a, 12b) ed una rispettiva seconda disposizione di magneti (24) per ciascuna prima disposizione di magneti (22) portata da detta struttura orientabile (2); ciascuna prima disposizione di magneti (22) essendo accoppiata magneticamente ad una rispettiva seconda disposizione di magneti (24) per creare una forza di interazione magnetica atta a trasferire la forza di azionamento generata dal rispettivo braccio di azionamento (12a, 12b) a detta struttura orientabile (2).

15. Procedimento secondo la rivendicazione 14, in cui formare dette prima e seconda disposizione di magneti (22, 24) comprende eseguire una lavorazione di detta piastrina (1') dal retro di detta piastrina (1').

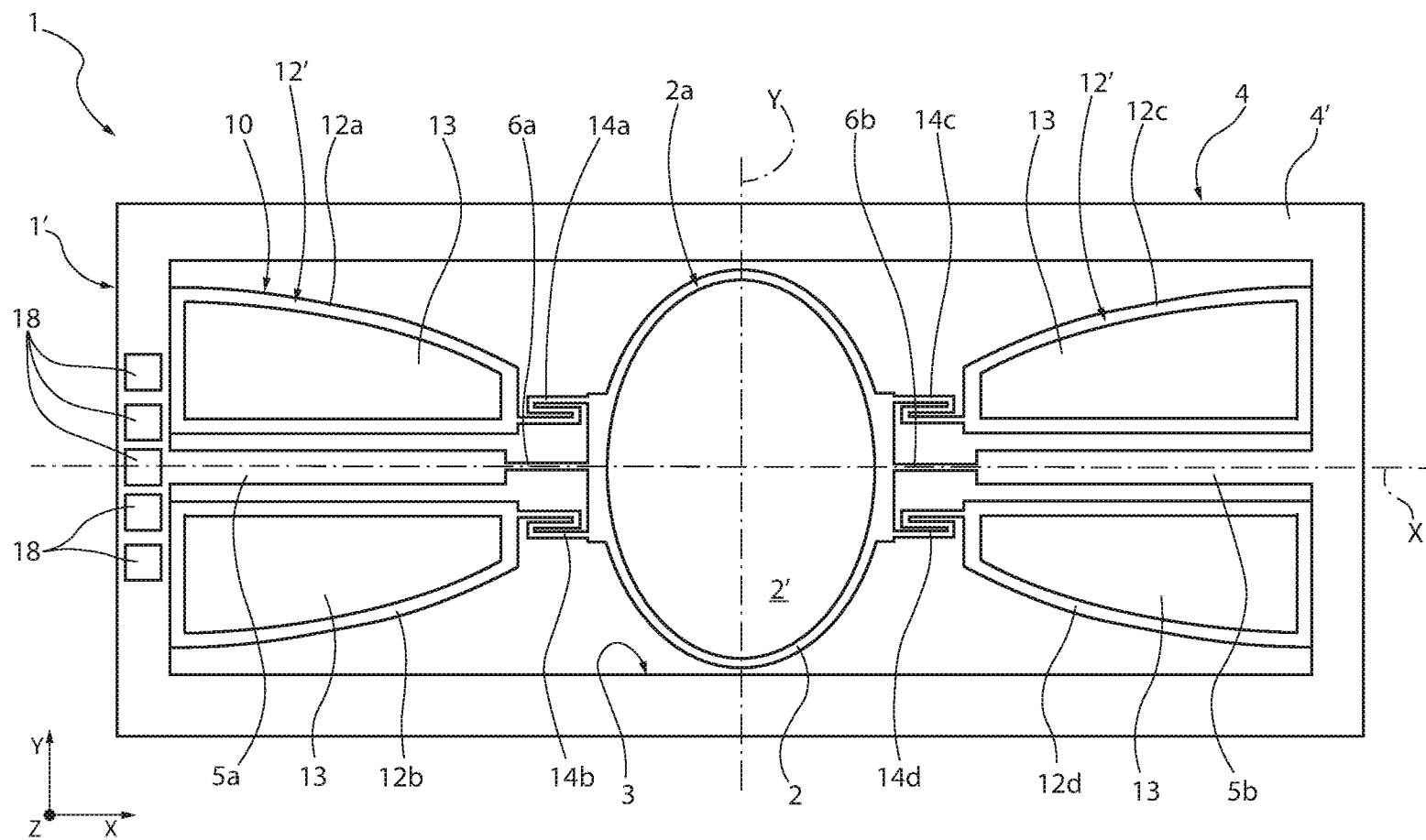


FIG.1

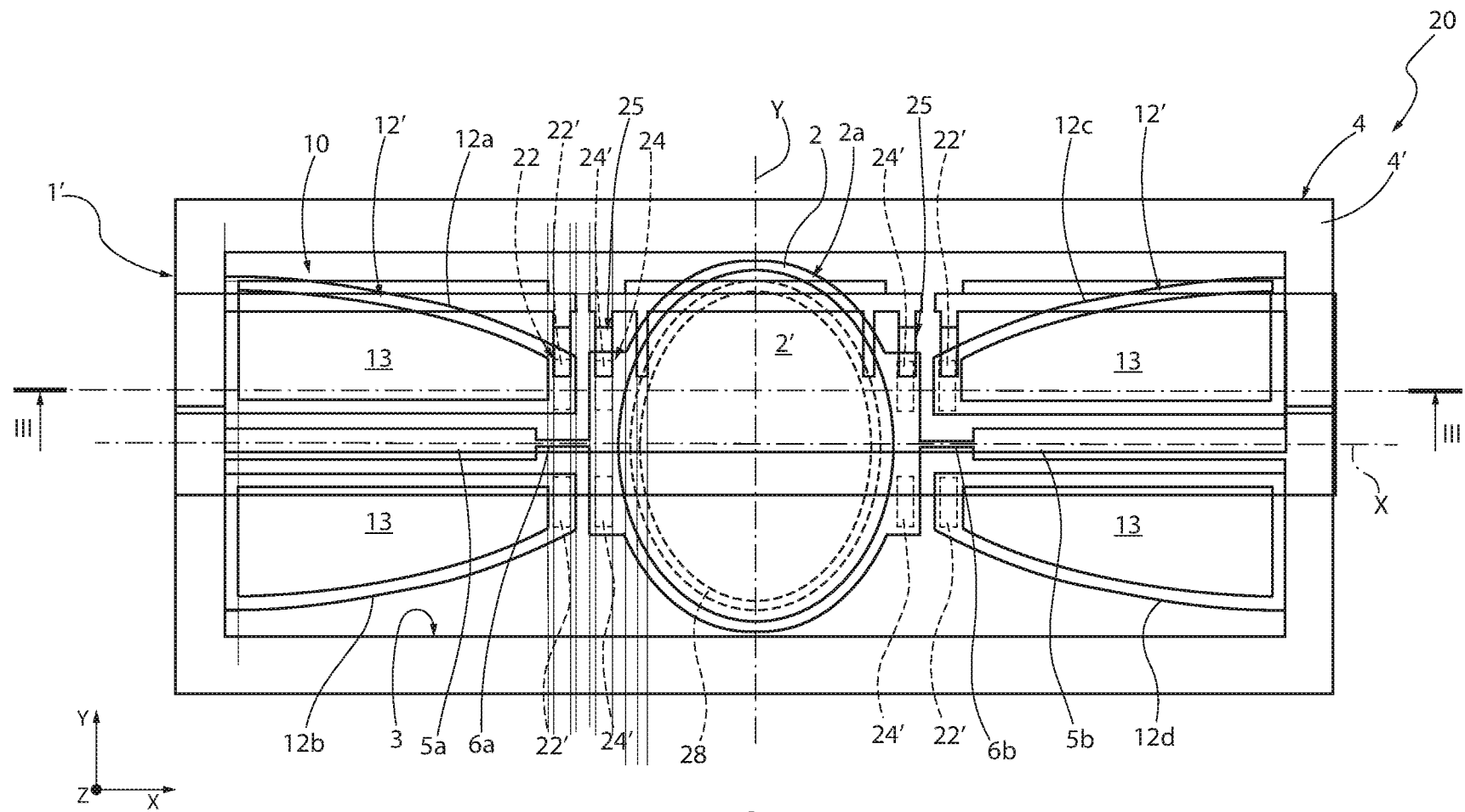
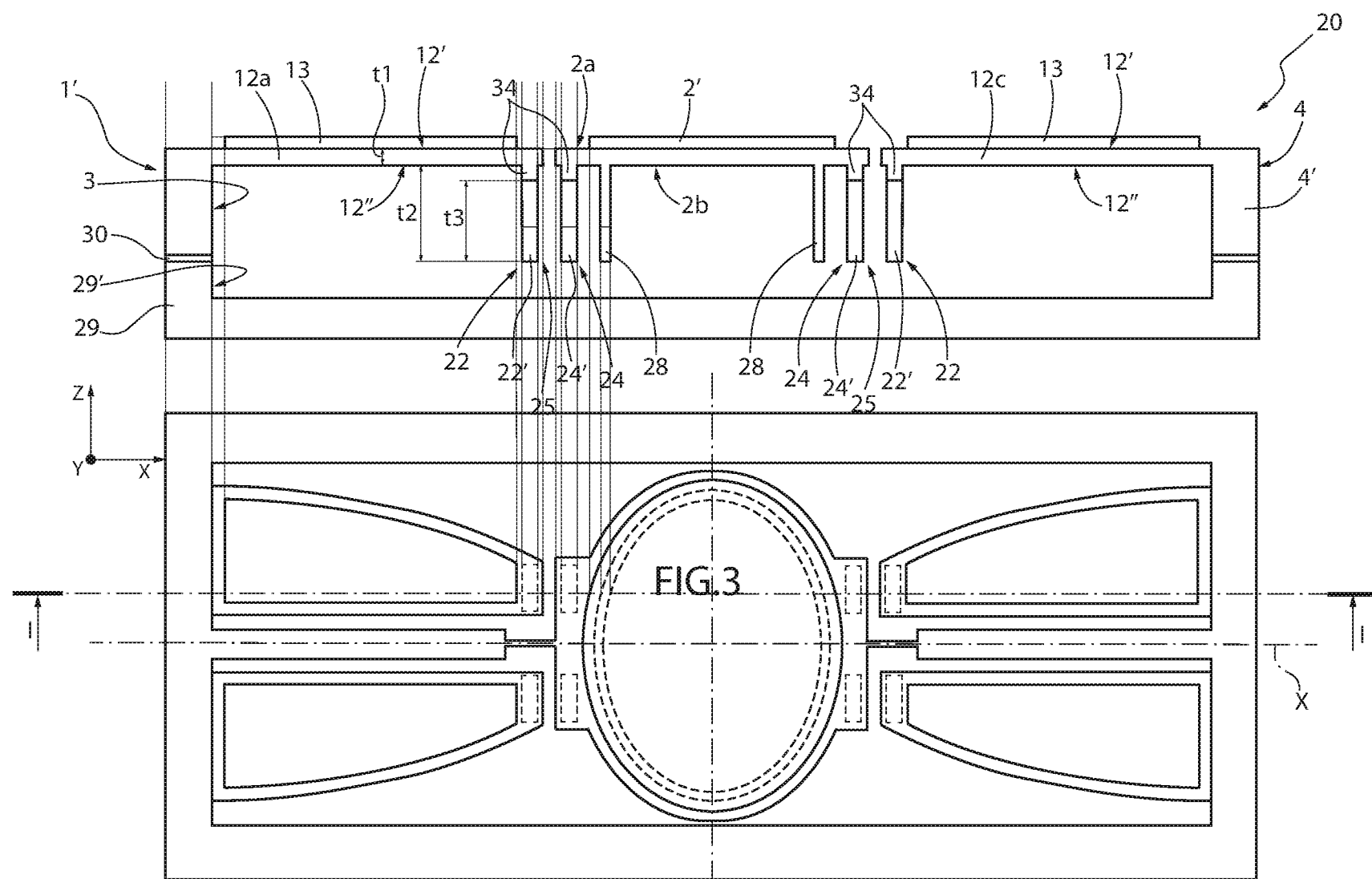


FIG.2



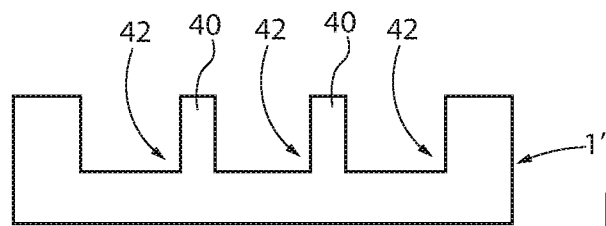


FIG. 4A

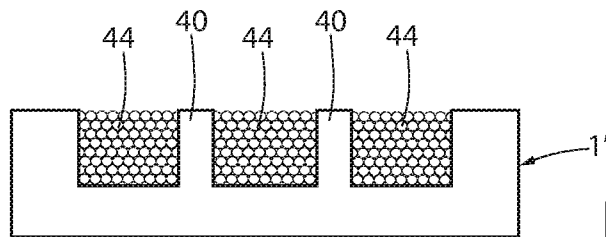


FIG. 4B

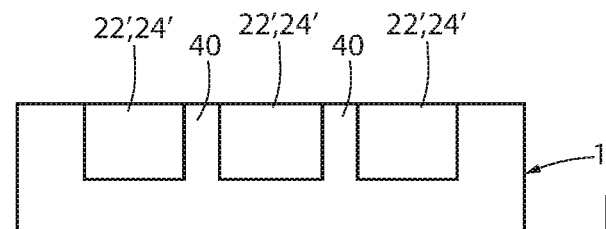


FIG. 4C

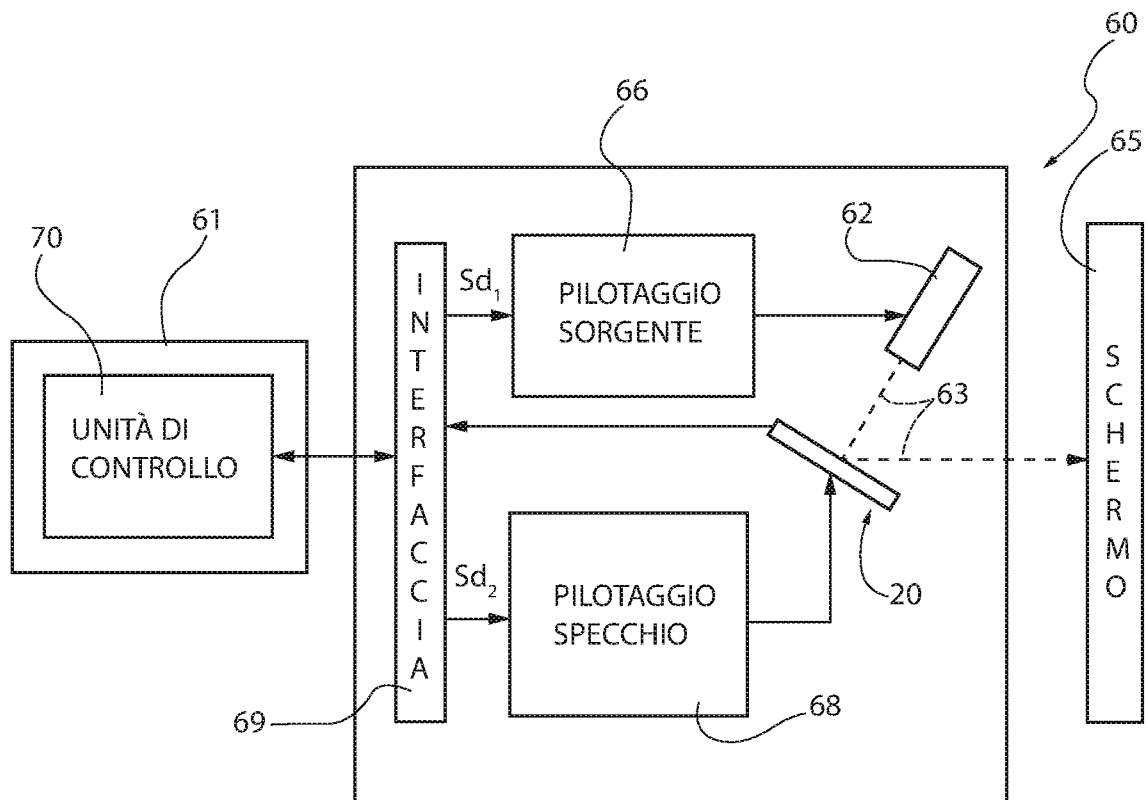


FIG. 7

