

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102021000014183
Data Deposito	31/05/2021
Data Pubblicazione	30/11/2022

Classifiche IPC

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	01	B	11	02

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	01	S	17	88

Titolo

ATTUATORE MEMS PER MOVIMENTO IN PIANO DI UNA MASSA MOBILE E MODULO OTTICO COMPRENDENTE L'ATTUATORE MEMS

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"ATTUATORE MEMS PER MOVIMENTO IN PIANO DI UNA MASSA MOBILE
E MODULO OTTICO COMPRENDENTE L'ATTUATORE MEMS"

5 di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI 2

20864 AGRATE BRIANZA (MB)

Inventori: BONI Nicolo', GATTERE Gabriele, RIANI Manuel,

10 CARMINATI Roberto

* * *

La presente invenzione è relativa ad un attuatore MEMS
("Micro Electro-Mechanical Systems") per movimento in piano
di una massa mobile e ad un modulo ottico comprendente
15 l'attuatore MEMS.

Come noto, sono diffusi attuatori realizzati in
tecnologia MEMS, a partire da una fetta di materiale
semiconduttore quale silicio, che sono incorporati, ad
esempio, in dispositivi per applicazioni ottiche,
20 interruttori elettromeccanici, micropompe e microvalvole per
applicazioni microfluidiche.

Gli attuatori MEMS permettono infatti di ottenere
dispositivi aventi dimensioni ridotte, basso consumo
energetico ed elevata precisione di attuazione.

25 In generale, un attuatore MEMS comprende un substrato,

una massa mobile sospesa ad una altezza sul substrato, e un sistema di attuazione, il quale è configurato per causare uno spostamento della massa mobile utilizzando un principio di attuazione di tipo elettrostatico, piezoelettrico o
5 elettromagnetico.

In specifiche applicazioni, è desiderabile che il sistema di attuazione provochi una traslazione in piano della massa mobile; ovvero, in modo tale da non modificare l'altezza della massa mobile rispetto al substrato.

10 Ad esempio, la domanda di brevetto US 17124027 depositata il 16 dicembre 2020, descrive un apparecchio ottico, qui di seguito brevemente descritto, il quale incorpora un attuatori MEMS basato su un principio di attuazione elettrostatico.

15 In dettaglio, le figure 1 e 2 mostrano un apparecchio ottico 1 in un sistema di riferimento cartesiano XYZ comprendente un primo asse X, un secondo asse Y ed un terzo asse Z.

L'apparecchio ottico 1 comprende un substrato 5, una
20 cornice di supporto 7 e uno strato ottico 10, il quale è fissato al substrato 5 tramite la cornice di supporto 7.

Un rilevatore ottico 13, in particolare una matrice bidimensionale di diodi a valanga a singolo fotone ("Single-Photon Avalanche Diodes", SPADs), e una sorgente laser 16,
25 in particolare un array di laser a cavità verticale a

emissione superficiale ("Vertical Cavity Surface Emitting Lasers", VCSELs) sono incollati su una faccia del substrato 5 rivolta verso lo strato ottico 10.

Lo strato ottico 10 forma una pluralità di porzioni di
5 ancoraggio 19, le quali sono solidali alla cornice di supporto 7, una massa mobile 21 e una pluralità di strutture elastiche di accoppiamento 23, le quali accoppiano elasticamente la massa mobile 21 con una rispettiva porzione di ancoraggio 19.

10 Le strutture elastiche di accoppiamento 23 sono configurate in modo da essere cedevoli lungo il primo asse X e sono rigide lungo il secondo asse Y e il terzo asse Z.

Lo strato ottico 10 supporta inoltre una lente di trasmissione 25 e una lente di ricezione 27, le quali sono
15 entrambe supportate dalla massa mobile 21.

In dettaglio, la lente di trasmissione 25 è disposta sopra la sorgente laser 16 e la lente di ricezione 27 è disposta sopra il rilevatore ottico 13.

L'apparecchio 1 comprende inoltre un primo e un secondo
20 sistema di attuazione elettrostatico 30A, 30B, i quali sono reciprocamente simmetrici rispetto ad un asse mediano parallelo al secondo asse Y.

Il primo e il secondo sistema di attuazione elettrostatico 30A, 30B comprendono ciascuno una porzione di
25 attuazione fissa 33, un gruppo di elettrodi fissi 35 e un

gruppo di elettrodi mobili 37.

Le porzioni di attuazione fissa 33 sono fissate alla cornice di supporto 7 ed elettrodi del gruppo di elettrodi fissi 35 si estendono ciascuno a partire dalla rispettiva
5 porzione di attuazione fissa 33, in direzione parallela al primo asse X, in direzione della massa mobile 21.

Elettrodi del gruppo di elettrodi mobili 37 si estendono ciascuno a partire dalla massa mobile 21, in direzione parallela al primo asse X, in direzione della rispettiva
10 porzione di attuazione fissa 33.

In dettaglio, gli elettrodi del gruppo di elettrodi mobili 37 sono sfalsati, lungo il secondo asse Y, rispetto agli elettrodi del gruppo di elettrodi fissi 35, in modo da formare una struttura a pettine. In altre parole, gli
15 elettrodi del gruppo di elettrodi mobili 37 e del gruppo di elettrodi fissi 35 sono tra loro interdigitati.

In uso, la sorgente laser 16 genera un fascio di luce di invio 40 che si propaga verso lo strato ottico 10 e attraversa la lente di trasmissione 25. La lente di
20 trasmissione 25 modifica la forma del fascio di luce di invio 40, generando un fascio di luce modificato 42 che si propaga in direzione parallela al terzo asse Z, in allontanamento dall'apparecchio 1.

Quando il fascio di luce modificato 42 incontra un
25 oggetto (qui non mostrato), una porzione 44 del fascio di

luce modificato 42 viene riflessa dall'ostacolo e incide sulla lente di ricezione 27. La lente di ricezione 27 è configurata per focalizzare la porzione 44 del fascio di luce modificato 42, generando così un fascio focalizzato 46
5 incidente sul rilevatore ottico 13.

L'apparecchio ottico 1 è configurato per misurare un tempo (tempo di volo) che è intercorso tra l'invio del fascio di luce di invio 40 e la ricezione del fascio focalizzato 46. A partire dalla misura del tempo di volo, l'apparecchio
10 ottico 1 è in grado di calcolare una distanza tra l'oggetto e l'apparecchio ottico 1. Il tempo di volo è infatti una funzione della distanza tra l'oggetto e l'apparecchio ottico 1.

Applicando una tensione tra il gruppo di elettrodi fissi
15 33 e il gruppo di elettrodi mobili 35, viene generata una forza elettrostatica lungo il primo asse X, la quale causa una corrispondente traslazione della massa mobile 21, in direzione parallela al primo asse X.

Ciò fa sì che la lente di trasmissione 25 modifichi la
20 direzione di propagazione del fascio di luce di invio, generando un fascio di luce inclinato 42A. Il fascio di luce inclinato 42A forma un angolo rispetto al terzo asse Z che varia in funzione della posizione della massa mobile 21; esso inciderà dunque su di una differente porzione
25 dell'ostacolo, formando un fascio riflesso inclinato 44A.

Il fascio riflesso inclinato 44A è focalizzato sul rilevatore ottico 13 dalla lente di ricezione 27.

Il corrispondente tempo di volo è quindi indicativo della distanza tra la seconda porzione dell'oggetto e
5 l'apparecchio ottico 1.

Misurando il tempo di volo associato a differenti posizioni della massa mobile 21 è possibile quindi ottenere una ricostruzione tridimensionale dell'oggetto.

Per scansionare interamente un oggetto, viene causato
10 uno spostamento elevato della massa mobile 21, lungo il primo asse X, ad esempio maggiore di 50 μm .

Una attuazione quasi-statica del primo e del secondo sistema di attuazione elettrostatico 30A, 30B, ad esempio utilizzando una tensione di polarizzazione continua,
15 comporterebbe piccoli valori di spostamento in piano della massa mobile 21, ad esempio compresi tra 10 μm e 20 μm .

Di conseguenza, a tal proposito, il primo e il secondo sistema di attuazione elettrostatico 30A, 30B sono attuati in risonanza; ovvero, viene applicata una tensione avente
20 una frequenza pari alla frequenza di risonanza della massa mobile 21.

L'attuazione in risonanza fa sì che lo spostamento della massa mobile 21 lungo il primo asse X abbia un profilo sinusoidale nel tempo.

25 Tuttavia, in alcune applicazioni, è desiderabile che lo

spostamento della massa mobile 21 lungo il primo asse X segua un profilo nel tempo differente, ad esempio lineare o a gradino.

Scopo della presente invenzione è quello di superare
5 gli svantaggi della tecnica nota.

Secondo la presente invenzione vengono forniti un attuatore MEMS e un modulo ottico comprendente l'attuatore MEMS come definiti nelle rivendicazioni allegate.

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

- la figura 1 mostra una vista in pianta dall'alto di un apparecchio ottico noto;
- 15 - la figura 2 mostra una sezione trasversale dell'apparecchio ottico di figura 1, lungo la linea di sezione II-II di figura 1;
- la figura 3 mostra una vista in pianta dall'alto del presente attuatore MEMS;
- 20 - la figura 4 mostra una sezione trasversale di un dettaglio dell'attuatore MEMS di figura 3, lungo la linea di sezione IV-IV di figura 3;
- la figura 5 mostra una sezione trasversale dell'attuatore MEMS di figura 3, lungo la linea di sezione
25 V-V di figura 3;

- la figura 6 mostra una vista in pianta dall'alto di un altro dettaglio ingrandito dell'attuatore MEMS di figura 3;

5 - la figura 7 mostra una vista in pianta dall'alto di un ulteriore dettaglio ingrandito dell'attuatore MEMS di figura 3;

- la figura 8 mostra una sezione trasversale del dettaglio di figura 7, lungo la linea di sezione VIII-VIII di figura 7;

10 - la figura 9 mostra una sezione trasversale del dettaglio di figura 7, lungo la linea di sezione IX-IX di figura 7;

15 - la figura 10 mostra una sezione trasversale del dettaglio di figura 7, lungo la linea di sezione X-X di figura 7;

- la figura 11 mostra schematicamente il dettaglio di figura 4, in uso;

- la figura 12 mostra la sezione trasversale di figura 5 dell'attuatore MEMS di figura 3, in uso;

20 - la figura 13 mostra una vista in pianta dall'alto del presente attuatore MEMS, secondo una diversa forma di realizzazione;

25 - la figura 14 mostra una sezione trasversale schematica di un dettaglio dell'attuatore MEMS di figura 13, in uso, in una condizione di funzionamento;

- la figura 15 mostra una sezione trasversale dell'attuatore MEMS di figura 13, in uso, lungo la linea di sezione XV-XV di figura 13, nella condizione di funzionamento di figura 14;

5 - le figura 16-18 mostrano ciascuna una vista in pianta dall'alto del presente attuatore MEMS, secondo una rispettiva forma di realizzazione; e

- la figura 19 mostra uno schema a blocchi di un apparecchio comprendente il presente modulo ottico;

10 - la figura 20 mostra una sezione trasversale del presente modulo ottico incorporante l'attuatore MEMS di figura 3, in una prima condizione di utilizzo;

- la figura 21 mostra una vista in pianta dall'alto di una distribuzione spaziale di una sorgente di luce del
15 modulo ottico di figura 20;

- la figura 22 mostra una vista in pianta dall'alto di una distribuzione spaziale di un fascio di luce incidente su un rilevatore ottico del modulo ottico di figura 20;

- la figura 23 mostra una sezione trasversale del
20 presente modulo ottico incorporante l'attuatore MEMS di figura 3, in una seconda condizione di utilizzo;

- le figure 24-28 mostrano ciascuna una sezione trasversale del presente modulo ottico, secondo una rispettiva forma di realizzazione;

25 - la figura 29 mostra una vista in pianta dall'alto

del presente modulo ottico, secondo una diversa forma di realizzazione; e

- la figura 30 mostra una sezione trasversale del modulo ottico di figura 29, lungo la linea di sezione XXX-
5 XXX di figura 29.

La descrizione che segue fa riferimento alla disposizione mostrata; di conseguenza, espressioni quali "sopra", "sotto", "superiore", "inferiore", "destra", "sinistra" sono relative alle figure allegate e non devono
10 essere interpretate in modo limitativo.

Le figure 3-5 mostrano un attuatore MEMS 100 in un sistema di riferimento cartesiano XYZ comprendente un primo asse X, un secondo asse Y e un terzo asse Z.

In questa forma di realizzazione, l'attuatore MEMS 100
15 è simmetrico rispetto ad un piano di simmetria S parallelo ad un piano YZ del sistema di riferimento cartesiano XYZ.

L'attuatore MEMS 100 è formato in un corpo 101 comprendente qui un substrato 105, un corpo strutturale 107 e un corpo di supporto 110.

20 Il substrato 105 ha una superficie 105A ed è ad esempio di materiale semiconduttore, vetro o plastica.

Il corpo strutturale 107 ha una prima e una seconda superficie 107A, 107B e si estende a distanza, lungo il terzo asse Z, dalla superficie 105A del substrato 105.

25 Il corpo di supporto 110 si estende tra il substrato

105 e il corpo strutturale 107.

Il corpo di supporto 110 può essere dello stesso materiale del substrato 105 o di un materiale diverso, ad esempio può essere monolitico al substrato 105 o ad esso
5 incollato.

Il corpo di supporto 110 forma qui una pluralità di pilastri 113, di cui uno visibile in figura 4, che si estendono tra la superficie 105A del substrato 105 e la seconda superficie 107B del corpo strutturale 107.

10 Il corpo strutturale 107 è di materiale semiconduttore, ad esempio polisilicio, ed è qui formato da un solo strato di materiale semiconduttore. Tuttavia, in generale, il corpo strutturale 107 può essere formato da uno o più strati di materiale semiconduttore sovrapposti.

15 Inoltre, secondo una forma di realizzazione, il corpo strutturale 107 può comprendere anche uno o più strati di materiale isolante, ad esempio ossido di silicio, utili in fase di fabbricazione.

Il corpo strutturale 107 è sostanzialmente planare ed
20 ha uno spessore t_s , lungo il terzo asse Z, compreso ad esempio tra 5 μm e 50 μm .

Il corpo strutturale 107 si estende sul corpo di supporto 110. In particolare, la seconda superficie 107B del corpo strutturale 107 è incollata ("bonded") sui pilastri
25 113.

Il corpo strutturale 107 forma una pluralità di prime e seconde regioni di ancoraggio 117, 118, le quali si estendono ciascuna su un rispettivo pilastro 113, e una regione sospesa 115. In pratica, le prime e le seconde
5 regioni di ancoraggio 117, 118 e la regione sospesa 115 sono fra loro monolitiche e formate dallo stesso strato o pila di strati.

Le prime e le seconde regioni di ancoraggio 117, 118 fissano il corpo strutturale 107 al substrato 105 e formano
10 regioni di vincolo della regione sospesa 115.

In condizione di riposo, la regione sospesa 115 è sospesa sul substrato 105 ad una altezza di riposo H_1 (figura 5) misurata lungo il terzo asse Z.

Nella forma di realizzazione mostrata, la regione
15 sospesa 115 del corpo strutturale 107 è sagomata in modo tale da formare una massa mobile 120, due strutture elastiche di vincolo 123A, 123B, quattro strutture di trasformazione 126 e quattro strutture di attuazione 130.

La massa mobile 120 ha qui una forma sostanzialmente
20 rettangolare in vista in pianta dall'alto. In dettaglio, la massa mobile 120 ha un primo e un secondo lato L_1 , L_2 , i quali si estendono paralleli al secondo asse Y e hanno ciascuno una lunghezza, lungo il secondo asse Y, compresa ad esempio tra 100 μm e 4 mm, in particolare 2 mm. Inoltre, la
25 massa mobile 120 ha un terzo e un quarto lato L_3 , L_4 , i quali

si estendono paralleli al primo asse X e hanno una lunghezza, lungo il primo asse X, compresa ad esempio tra 100 μm e 4 mm, in particolare 1 mm.

In questa forma di realizzazione, le strutture elastiche di vincolo 123A, 123B sono formate rispettivamente da una pluralità di primi elementi di accoppiamento 133A, i quali si estendono parallelamente al primo asse X, sul primo lato L1 della massa mobile 120, e da una pluralità di secondi elementi di accoppiamento 133B, i quali si estendono parallelamente al primo asse X, sul secondo lato L2 della massa mobile 120.

In dettaglio, i primi elementi di accoppiamento 133A si estendono ciascuno, lungo il primo asse X, tra il primo lato L1 della massa mobile 120 e una rispettiva seconda regione di ancoraggio 118.

I secondi elementi di accoppiamento 133B si estendono ciascuno, lungo il primo asse X, tra il secondo lato L2 della massa mobile 120 e una rispettiva seconda regione di ancoraggio 118.

In dettaglio, qui, i primi elementi di accoppiamento 133A sono uguali ai secondi elementi di accoppiamento 133B e sono simmetrici ai secondi elementi di accoppiamento 133B rispetto al piano di simmetria S.

I primi e i secondi elementi di accoppiamento 133A, 133B sono cedevoli lungo il secondo asse Y e sono rigidi

lungo il primo asse X e il terzo asse Z. A tale scopo, in questa forma di realizzazione, i primi e i secondi elementi di accoppiamento 133A, 133B hanno ciascuno una larghezza lungo il secondo asse Y che è minore del rispettivo spessore t_s , lungo il terzo asse Z, e di una rispettiva lunghezza, lungo il primo asse X.

Le strutture di attuazione 130 hanno ciascuna una estremità fissa F, la quale è fissata ad una rispettiva prima regione di ancoraggio 117, e una estremità libera M, la quale è accoppiata ad una rispettiva struttura di trasformazione 126.

Le strutture di attuazione 130 comprendono una prima struttura di attuazione 130A, una seconda struttura di attuazione 130B, una terza struttura di attuazione 130C e una quarta struttura di attuazione 130D, le quali sono disposte ciascuna in corrispondenza di un rispettivo angolo della massa mobile 120.

La prima, la seconda, la terza e la quarta struttura di attuazione 130A-130D si estendono ciascuna parallelamente al primo asse X tra la rispettiva estremità fissa F e la rispettiva estremità libera M.

La prima, la seconda, la terza e la quarta struttura di attuazione 130A-130D formano ciascuna una trave a sbalzo avente una lunghezza, misurata lungo il primo asse X, compresa ad esempio tra 500 μm e 4 mm, e una lunghezza,

misurata lungo il secondo asse Y, compresa ad esempio tra 100 μm e 2 mm.

L'attuatore MEMS 100 comprende una pluralità di elementi piezoelettrici di attuazione 135, i quali si
5 estendono ciascuno su una rispettiva struttura di attuazione 130, sopra la prima superficie 107A del corpo strutturale 107.

In questa forma di realizzazione, gli elementi piezoelettrici di attuazione 135 occupano ciascuno
10 sostanzialmente una stessa area, su un piano XY del sistema di riferimento cartesiano XYZ, della rispettiva struttura di attuazione 130; ovvero, si estendono ciascuno approssimativamente per tutta la lunghezza, lungo il primo asse X e lungo il secondo asse Y, della rispettiva struttura
15 di attuazione 130.

Gli elementi piezoelettrici di attuazione 135 sono strutture a condensatore comprendenti ciascuna una pila formata da un elettrodo inferiore 137 estendentesi sulla prima superficie 107A del corpo strutturale 107, una regione
20 piezoelettrica 139 direttamente sovrapposta all'elettrodo inferiore 137 e un elettrodo superiore 141 direttamente sovrapposto alla regione piezoelettrica 139.

L'elettrodo inferiore 137 e l'elettrodo superiore 141 possono essere formati ciascuno da uno o più strati di
25 materiale conduttivo.

La regione piezoelettrica 139 è uno strato sottile di materiale piezoelettrico, ad esempio piombo zirconato di titanio (PZT), BaTiO_3 , KNN (niobato di sodio e potassio), PbTiO_2 o PbNb_2O_6 , avente uno spessore compreso ad esempio tra
5 0,5 μm e 5 μm .

L'elettrodo inferiore 137 e l'elettrodo superiore 139 sono accoppiati elettricamente ad un circuito di polarizzazione tramite apposite piste di collegamento elettrico, qui non mostrate.

10 Le strutture di trasformazione 126 si estendono ciascuna tra l'estremità mobile M di una rispettiva struttura di attuazione 130 e la massa mobile 120.

Le strutture di trasformazione 126 comprendono una prima struttura di trasformazione 126A, una seconda
15 struttura di trasformazione 126B, una terza struttura di trasformazione 126C e una quarta struttura di trasformazione 126D.

Qui, la prima struttura di trasformazione 126A si estende tra l'estremità libera M della prima struttura di
20 attuazione 130A e una rispettiva porzione del terzo lato L3 della massa mobile 120. La seconda struttura di trasformazione 126B si estende tra l'estremità libera M della seconda struttura di attuazione 130B e una rispettiva porzione del terzo lato L3 della massa mobile 120. La terza
25 struttura di trasformazione 126C si estende tra l'estremità

libera M della terza struttura di attuazione 130C e una
rispettiva porzione del quarto lato L4 della massa mobile
120. La quarta struttura di trasformazione 126D si estende
tra l'estremità libera M della terza struttura di attuazione
5 130D e una rispettiva porzione del quarto lato L4 della massa
mobile 120.

In dettaglio, le strutture di trasformazione 126A-126D
comprendono ciascuna una struttura elastica di
disaccoppiamento 150 e una struttura elastica di conversione
10 160. Le strutture di trasformazione 126A-126D comprendono
inoltre due strutture di irrigidimento 155, che si estendono
qui parallelamente al primo asse X, di fianco alla massa
mobile 120. In particolare, in questa forma di realizzazione,
la prima e la seconda struttura di trasformazione 126A, 126B
15 condividono una stessa struttura di irrigidimento 155 e la
terza e la quarta struttura di trasformazione 126C, 126D
condividono una stessa struttura di irrigidimento 155.

Ciascuna struttura elastica di disaccoppiamento 150 ha
una prima estremità accoppiata all'estremità libera M della
20 rispettiva struttura di attuazione 130 e una seconda
estremità accoppiata ad una estremità K1 di una rispettiva
struttura di irrigidimento 155.

Come mostrato in figura 6, in questa forma di
realizzazione, ciascuna struttura elastica di
25 disaccoppiamento 150 forma una struttura chiusa ad anello.

In dettaglio, la struttura di disaccoppiamento 150 comprende una prima e una seconda porzione di accoppiamento 162A, 162B, un primo e un secondo braccio primario 164A, 164B e un primo e un secondo braccio secondario 166A, 166B.

5 Il primo e il secondo braccio primario 164A, 164B si estendono ad una distanza reciproca in una direzione parallela al primo asse X e hanno ciascuno un rapporto di forma rettangolare. Il primo e il secondo braccio primario 164A, 164B hanno ciascuno una lunghezza misurata lungo il
10 secondo asse Y che è maggiore di una rispettiva lunghezza misurata lungo il primo asse X.

Il primo e il secondo braccio secondario 166A, 166B si estendono ciascuno in una direzione parallela al primo asse X tra una rispettiva estremità del primo braccio primario
15 164A e una rispettiva estremità del secondo braccio primario 164B. Il primo e il secondo braccio secondario 166A, 166B hanno una lunghezza misurata lungo il primo asse X che è minore della lunghezza del primo e del secondo braccio primario 164A, 164B, misurata lungo il secondo asse Y.

20 La prima porzione di accoppiamento 162A si estende in una direzione parallela al primo asse X tra l'estremità libera M della rispettiva struttura di attuazione 130 e il primo braccio primario 164A, in particolare fino ad una porzione mediana del primo braccio primario 164A.

25 La seconda porzione di accoppiamento 162B si estende in

una direzione parallela al primo asse X tra l'estremità K1 della rispettiva struttura di irrigidimento 155 e il secondo braccio primario 164B, in particolare fino ad una porzione mediana del secondo braccio primario 164B.

5 La struttura di irrigidimento 155 si estende tra e accoppia meccanicamente la rispettiva struttura di disaccoppiamento 150 e la rispettiva struttura elastica di conversione 160.

10 In questa forma di realizzazione, la struttura di irrigidimento 155 si estende parallelamente al primo asse X e ha forma rettangolare in vista in pianta dall'alto.

15 La descrizione delle strutture elastiche di conversione 160 fa riferimento agli elementi elastici di trasformazione descritti nella domanda di brevetto italiana 102020000003868 depositata il 25/02/2020 a nome della Richiedente.

20 Le strutture elastiche di conversione 160 della prima, seconda, terza e quarta struttura di trasformazione 126A-126D sono sostanzialmente uguali tra loro e traslate nel piano XY. In dettaglio, la struttura elastica di conversione 160 della prima struttura di trasformazione 126A è simmetrica alla struttura elastica di conversione 160 della seconda struttura di trasformazione 126B rispetto al piano di simmetria S ed è uguale e traslata lungo il secondo asse Y rispetto alla struttura elastica di conversione 160 della
25 quarta struttura di trasformazione 126D. La struttura

elastica di conversione 160 della terza struttura di trasformazione 126C è simmetrica alla struttura elastica di conversione 160 della quarta struttura di trasformazione 126D rispetto al piano di simmetria S ed è uguale e traslata lungo il secondo asse Y rispetto alla struttura elastica di conversione 160 della seconda struttura di trasformazione 126B.

Le strutture elastiche di conversione 160 si estendono ciascuna tra una rispettiva prima estremità di connessione E1, accoppiata alla rispettiva struttura di irrigidimento 155, e una rispettiva seconda estremità di connessione E2, accoppiata alla massa mobile 120, in particolare, qui, con un rispettivo spigolo della massa mobile 120.

Le strutture elastiche di conversione 160 sono cedevoli in direzione parallela al secondo asse Y e al terzo asse Z, e sono rigide in direzione parallela al primo asse X.

Come mostrato a titolo di esempio in figura 7 per la prima struttura di trasformazione 126A, le strutture elastiche di conversione 160 sono formate ciascuna da una rispettiva prima porzione 160A e da una rispettiva seconda porzione 160B, tra loro uguali e traslate lungo il secondo asse Y. In pratica, le strutture elastiche di conversione 160 hanno, in vista dall'alto, una struttura ripiegata ("folded").

La prima e la seconda porzione 160A, 160B delle

strutture di conversione 160 comprendono una rispettiva porzione allungata superiore 170 e una rispettiva porzione allungata inferiore 175, le quali hanno, a riposo, una forma allungata estendentesi in direzione parallela al primo asse
5 X.

Come visibile nelle sezioni trasversali delle figure 8-10, la porzione allungata superiore 170 e la porzione allungata inferiore 175 sono disposte a distanza lungo il secondo asse Y e a differente altezza lungo il terzo asse Z.

10 In dettaglio, considerando l'orientamento mostrato dell'attuatore MEMS 100, con il corpo strutturale 107 disposto superiormente al corpo di supporto 110 e al substrato 105, la porzione allungata superiore 170 è disposta superiormente rispetto alla porzione allungata inferiore
15 175.

La prima e la seconda porzione 160A, 160B delle strutture di conversione 160 comprendono anche porzioni trasversali 180 estendentesi fra ciascuna porzione allungata superiore 170 e la rispettiva porzione allungata inferiore
20 175.

Il numero e la spaziatura delle porzioni trasversali 180 possono essere scelti in funzione dell'elasticità desiderata per le strutture elastiche di conversione 160. In ogni caso, la presenza di più porzioni trasversali 180
25 consente di accoppiare meccanicamente le corrispondenti

porzioni allungate superiori e inferiori 170, 175, e quindi evitare che queste ultime si deformino in modo indipendente.

Inoltre, le strutture elastiche di conversione 160 comprendono ciascuna una prima porzione di collegamento 185A, una seconda porzione di collegamento 185B e una terza porzione di collegamento 185C.

La prima porzione di collegamento 185A accoppia tra loro la rispettiva prima e seconda porzione 160A, 160B. In dettaglio, la prima porzione di collegamento 185A si estende tra ed è accoppiata ad una prima estremità della porzione allungata inferiore 175 della prima porzione 160A e ad una prima estremità della porzione allungata superiore 170 della seconda porzione 160B.

La seconda porzione di collegamento 185B è accoppiata ad una seconda estremità della porzione allungata superiore 170 della prima porzione 160A e la terza porzione di collegamento 185C è accoppiata ad una seconda estremità della porzione allungata inferiore 175 della seconda porzione 160B.

In dettaglio, nella prima e nella seconda struttura di trasformazione 126A, 126B, la seconda porzione di collegamento 185B forma la prima estremità di connessione E1 e collega la struttura elastica di conversione 160 alla rispettiva struttura di irrigidimento 155 e la terza porzione di collegamento 185C forma la seconda estremità di

connessione E2 e collega la struttura elastica di conversione 160 alla massa mobile 120.

Invece, nella terza e nella quarta struttura di trasformazione 126C, 126D, la seconda porzione di collegamento 185B forma la seconda estremità di connessione E2 e collega la rispettiva struttura elastica di conversione 160 alla massa mobile 120 e la terza porzione di collegamento 185C forma la prima estremità di connessione E1 e collega la rispettiva struttura elastica di conversione 160 alla rispettiva struttura di irrigidimento 155.

La sezione di figura 9 mostra una prima terna di assi cartesiani locali $L'_1L'_2L'_3$, comprendente un primo asse locale L'_1 , un secondo asse locale L'_2 e un terzo asse locale L'_3 , e una seconda terna di assi cartesiani locali $L''_1L''_2L''_3$, comprendente un primo asse locale L''_1 , un secondo asse locale L''_2 e un terzo asse locale L''_3 .

I primi assi locali L'_1 , L''_1 , i secondi assi locali L'_2 , L''_2 e i terzi assi locali L'_3 , L''_3 sono paralleli, rispettivamente, al primo, al secondo e al terzo asse X, Y, Z del sistema di assi cartesiani XYZ.

In dettaglio, la prima terna di assi cartesiani locali $L'_1L'_2L'_3$ ha un'origine centrata nel baricentro della sezione della prima porzione 160A della struttura di conversione 160 mostrata in figura 9. La seconda terna di assi cartesiani locali $L''_1L''_2L''_3$ ha un'origine centrata nel baricentro

della sezione della seconda porzione 160B della struttura di conversione 160 mostrata in figura 9.

La figura 9 mostra anche gli assi principali di inerzia I'_1 , I'_2 della sezione della prima porzione 160A della
5 struttura di conversione 160 e gli assi principali di inerzia I''_1 , I''_2 della sezione della seconda porzione 160B della struttura di conversione 160.

Gli assi principali di inerzia I'_1 , I'_2 sono trasversali al secondo e al terzo asse locale L'_2 , L'_3 della prima
10 porzione 160A della struttura di conversione 160 e gli assi principali di inerzia I''_1 , I''_2 sono trasversali al secondo e al terzo asse locale L''_2 , L''_3 della seconda porzione 160B della struttura di conversione 160.

In questa forma di realizzazione, per ciascuna sezione
15 trasversale (presa parallelamente al piano YZ) della prima e della seconda porzione 160A, 160B della struttura elastica di conversione 160, gli assi principali di inerzia I''_1 , I''_2 , I''_1 , I''_2 hanno il medesimo orientamento.

Inoltre, per ciascuna sezione trasversale della prima
20 e della seconda porzione 160A, 160B della struttura elastica di conversione 160, è possibile calcolare un momento centrifugo di inerzia I_c , rispetto ad una corrispondente coppia di assi locali formata dal secondo e dal terzo asse locale L'_2 , L'_3 per la prima porzione 160A e dal secondo e
25 dal terzo asse locale L''_2 , L''_3 per la seconda porzione 160B

attraverso l'integrale:

$$I_c = \iint r_1 r_2 dA,$$

in cui r_1 e r_2 rappresentano la distanza di ciascun punto della sezione rispettivamente dal secondo e dal terzo asse locale L'_2, L'_3 , per la prima porzione 160A e dal secondo e dal terzo asse locale L''_2, L''_3 per la seconda porzione 160B, e dA rappresenta l'unità di area della sezione.

Il momento centrifugo di inerzia I_c è non nullo, dal momento che il secondo e il terzo asse locale L'_2, L'_3 e il secondo e il terzo asse locale L''_2, L''_3 non sono assi di simmetria della sezione rispettivamente della prima porzione 160A e della seconda porzione 160B, e quindi non coincidono con i rispettivi assi principali di inerzia I'_1, I'_2 e I''_1, I''_2 .

Ciò comporta che una forza applicata trasversalmente al primo asse principale di inerzia I'_1, I'_2 o al secondo asse principale di inerzia I''_1, I''_2 causa una flessione deviata ("skew bending") della corrispondente sezione della struttura elastica di conversione 160.

Ovvero, ad esempio, una forza applicata parallelamente al terzo asse locale L'_3 causa una conseguente deformazione sia lungo il terzo asse locale L'_3 che lungo il secondo asse locale L'_2 . In altre parole, una forza applicata alla struttura elastica di conversione 160 parallelamente al terzo asse Z causa una deformazione sia parallelamente al

terzo asse Z che parallelamente al secondo asse Y del sistema di coordinate cartesiane XYZ.

In uso, quando si desidera muovere la massa mobile 120, una tensione di polarizzazione è applicata tra l'elettrodo superiore 141 e l'elettrodo inferiore 137 (figura 4) degli
5 elementi piezoelettrici di attuazione 135, in particolare di tutti gli elementi piezoelettrici di attuazione 135.

Se la tensione di polarizzazione è diversa da zero, essa causa una deformazione della regione piezoelettrica 139
10 e quindi della corrispondente struttura di attuazione 130 ad essa solidale, come mostrato in figura 11 per la prima struttura di attuazione 130A.

In dettaglio, ciascuna struttura di attuazione 130 si incurva in una direzione trasversale rispetto al piano XY.
15 Per ciascuna struttura di attuazione 130, l'estremità fissa F non si muove, dal momento che è vincolata alla rispettiva prima regione di ancoraggio 117 del corpo strutturale 107, mentre l'estremità libera M si incurva verso l'alto. In particolare, l'estremità libera M trasla verso l'alto, lungo
20 il terzo asse Z, e subisce una rotazione attorno ad un asse parallelo al primo asse X.

La struttura di disaccoppiamento 150, la quale è vincolata all'estremità mobile M della struttura di attuazione 130, viene quindi spostata verso l'alto.

25 Conseguentemente, anche la struttura di irrigidimento

155, la quale, attraverso le strutture di disaccoppiamento 150, è vincolata alle sue estremità a due strutture di attuazione 130 che ruotano in direzione opposta, si sposta verso l'alto, lungo il terzo asse Z, ma non ruota.

5 Infatti, la struttura di disaccoppiamento 150 si deforma e permette di neutralizzare, in corrispondenza della sua estremità K1, la rotazione a cui è soggetta l'estremità libera M della struttura di attuazione 130.

10 In altre parole, l'estremità K1 di ciascuna struttura di disaccoppiamento 150 trasla verso l'alto, ma non ruota.

15 La traslazione delle strutture di irrigidimento 155 causa anche una traslazione verso l'alto, lungo il terzo asse Z, delle prime estremità di connessione E1 di tutte le strutture elastiche di conversione 160. A tale traslazione è associata una forza verticale, parallela al terzo asse Z.

 In prima approssimazione, la forza verticale non causa una flessione deviata in corrispondenza delle prime estremità di connessione E1, dal momento che esse sono solidali con le strutture di irrigidimento 155.

20 Invece, su porzioni intermedie delle strutture elastiche di conversione 160 che non sono vincolate alle strutture di irrigidimento 155 agisce una forza locale, la quale dipende dalla forza verticale ed è parallela a quest'ultima.

25 Di conseguenza, tali porzioni intermedie sono

sottoposte a flessione deviata, come mostrato in figura 12.

In figura 12, per chiarezza, la struttura di irrigidimento 155, la massa mobile 120 e le strutture elastiche di conversione 160 sono disegnate con una linea continua per indicarne la rispettiva posizione in uso, in
5 una condizione di attuazione, e con una linea tratteggiata per indicarne la rispettiva posizione di riposo.

In condizione di attuazione, la struttura di irrigidimento 155 è disposta ad una altezza di lavoro H_2 ,
10 rispetto al substrato 105, maggiore dell'altezza di riposo H_1 .

L'altezza di lavoro H_2 può essere modificata variando il valore della tensione di polarizzazione. Inoltre, l'altezza di lavoro H_2 dipende dai parametri geometrici e
15 strutturali della struttura di attuazione 130 e degli elementi piezoelettrici di attuazione 135, ad esempio materiale e dimensioni, che possono essere stabiliti in fase di progettazione, in base ai requisiti di una specifica applicazione.

20 In particolare, la flessione deviata di ciascuna porzione intermedia subisce, rispetto al substrato 105, i) una traslazione parallelamente all'asse Z, ii) una traslazione parallelamente all'asse Y, e iii) una rotazione nel piano YZ.

25 Tuttavia, in prima approssimazione, la forza locale che

agisce sulla seconda estremità di connessione E2 delle strutture elastiche di conversione 160 (figura 7) non causa alcuna traslazione parallelamente all'asse Z, in quanto la massa mobile 120 è accoppiata meccanicamente agli elementi di accoppiamento 133A, 133B (figura 3), che sono rigidi per movimenti diretti parallelamente al terzo asse Z.

La seconda estremità di connessione E2 di ciascuna struttura elastica di conversione 160 trasla quindi parallelamente al secondo asse Y, lungo una prima direzione di movimento M_1 , schematicamente rappresentata da una freccia in figura 12. Di conseguenza, anche la massa mobile 120 trasla parallelamente al secondo asse Y, lungo la prima direzione di movimento M_1 .

In prima approssimazione, la massa mobile 120 rimane quindi, in uso, all'altezza di riposo H_1 rispetto al substrato 105.

Infatti, la massa mobile 120 subisce una traslazione verticale, lungo il terzo asse Z, molto minore rispetto al proprio spessore t_s , ad esempio minore di $3\text{ }\mu\text{m}$, a fronte di una elevata traslazione orizzontale, lungo il secondo asse Y, ad esempio maggiore di $50\text{ }\mu\text{m}$.

Inoltre, con riferimento ancora alla figura 12, le porzioni intermedie della prima porzione 160A delle strutture di conversione 160 sono ad una prima altezza intermedia H_3 rispetto al substrato 105, che è minore

dell'altezza di lavoro H_2 . Le sezioni intermedie della seconda porzione 160B delle strutture di conversione 160 sono ad una seconda altezza intermedia H_4 rispetto al substrato 105, che è minore della prima altezza intermedia H_3 e maggiore dell'altezza di riposo H_1 .

Al tempo stesso, ancora con riferimento alla figura 12, le porzioni intermedie della prima porzione 160A delle strutture di conversione 160 subiscono una traslazione, parallelamente al secondo asse Y, lungo la prima direzione di movimento M_1 , che è minore della traslazione, parallelamente al secondo asse Y, delle porzioni intermedie della seconda porzione 160B delle strutture di conversione 160.

In pratica, le strutture elastiche di conversione 160 convertono una traslazione verticale, ad esempio compresa tra $1\ \mu\text{m}$ e $200\ \mu\text{m}$, fuori piano, ovvero lungo l'asse Z, delle strutture di attuazione 130, in una traslazione orizzontale, ad esempio compresa tra $1\ \mu\text{m}$ e $200\ \mu\text{m}$, in particolare maggiore di $50\ \mu\text{m}$, in piano, ovvero lungo il secondo asse Y, della massa mobile 120.

L'attuatore MEMS 100 consente dunque, a fronte di una tensione di polarizzazione continua, compresa ad esempio tra 0 V e 65 V, di ottenere una elevata traslazione in piano della massa mobile 120. Inoltre, applicando una tensione variabile da zero ad un valore massimo e viceversa, è

possibile ottenere un movimento continuo, graduale della massa mobile 120 dalla posizione di riposo (con linea continua in figura 12) a quella di massima elongazione, e ritorno.

5 La figura 13 mostra una differente forma di realizzazione del presente attuatore MEMS, qui indicato da 400.

10 L'attuatore MEMS 400 ha una struttura generale simile all'attuatore MEMS 100 di figura 3; di conseguenza elementi in comune sono indicati dagli stessi numeri di riferimento e non sono ulteriormente descritti.

 L'attuatore MEMS 400 è formato nel corpo 101 comprendente anche qui il substrato 105, il corpo strutturale 107 e il corpo di supporto 110.

15 La regione sospesa 115 del corpo strutturale 107 forma anche qui la massa mobile 120, le strutture di vincolo 123A, 123B, le strutture di trasformazione 126A-126D e strutture di attuazione, qui indicate da 430A-430B. Di conseguenza, anche qui tali strutture sono monolitiche fra loro e alle
20 prime e seconde regioni di ancoraggio 117, 118.

 Anche qui, ciascuna struttura di trasformazione 126A-126D include una rispettiva struttura di disaccoppiamento 150 e una rispettiva struttura elastica di conversione 160. Anche qui, la regione sospesa 115 forma le strutture di
25 irrigidimento 155.

Inoltre, anche qui sono presenti quattro strutture di attuazione, in seguito indicate come prima, seconda, terza e quarta struttura di attuazione 430A-430D.

In questa forma di realizzazione, le strutture di
5 attuazione 430A-430D comprendono ciascuna una struttura di
attuazione di salita ("upward") 433, una struttura di
attuazione di discesa ("downward") 436 e una porzione di
giunzione 439, la quale accoppia reciprocamente la struttura
di attuazione di salita 433 e la struttura di attuazione di
10 discesa 436 di ciascuna struttura di attuazione 430A-430D.

Ciascuna struttura di attuazione di discesa 436 ha forma allungata, con una estremità fissa F, la quale è vincolata ad una rispettiva prima regione di ancoraggio 117, e una estremità di giunzione G1, opposta alla estremità fissa F.

15 Ciascuna struttura di attuazione di discesa 436 si
estende lungo il primo asse X tra la propria estremità fissa F e la propria estremità di giunzione G1, qui a forma rettangolare in vista in pianta dall'alto.

Ciascuna struttura di attuazione di salita 433 ha
20 anch'essa forma allungata, con una propria estremità di
giunzione G2, la quale è accoppiata all'estremità di
giunzione G1 della rispettiva struttura di attuazione di
discesa 436 tramite la rispettiva struttura di giunzione
439, e una estremità libera M, la quale è accoppiata ad una
25 rispettiva struttura di disaccoppiamento 150.

Ciascuna struttura di attuazione di salita 433 si estende in una direzione parallela al primo asse X tra la propria estremità di giunzione G2 e la propria estremità libera M, qui a forma rettangolare in pianta dall'alto.

5 In pratica, le strutture di attuazione di salita 433 e le strutture di attuazione di discesa 436 sono tra loro uguali fra loro e ciascuna struttura di attuazione di salita 433 si estende a fianco e parallelamente ad una rispettiva struttura di attuazione di discesa 436.

10 L'attuatore MEMS 400 comprende inoltre una pluralità di elementi piezoelettrici di attuazione di salita 440 e una pluralità di elementi piezoelettrici di attuazione di discesa 442, portati rispettivamente dalle strutture di attuazione di salita 433 e dalle strutture di attuazione di
15 discesa 436, in particolare sulla prima superficie 107A del corpo strutturale 107.

 Gli elementi piezoelettrici di attuazione di salita 440 e gli elementi piezoelettrici di attuazione di discesa 442 sono uguali tra loro e uguali agli elementi piezoelettrici
20 di attuazione 135 dell'attuatore MEMS 100 di figura 3.

 Gli elementi piezoelettrici di attuazione di salita 440 e gli elementi piezoelettrici di attuazione di discesa 442 sono accoppiati elettricamente a rispettivi circuiti di polarizzazione, qui non mostrati, tramite prime piste di
25 connessione 443 e, rispettivamente, seconde piste di

connessione 444, che ne permettono una polarizzazione distinta. Le prime e le seconde piste di connessione 443, 444 sono rappresentate, per semplicità, solo schematicamente da una rispettiva linea tratteggiata in figura 13.

5 In uso, in una prima condizione di funzionamento, una prima tensione di polarizzazione, rispetto ad una tensione di riferimento, ad esempio massa, è applicata agli elementi piezoelettrici di attuazione di salita 440, mentre gli elementi piezoelettrici di attuazione di discesa 442 sono
10 mantenuti alla tensione di riferimento.

 Analogamente a quanto sopra discusso, la prima tensione di polarizzazione causa una deformazione, in particolare un incurvamento, delle strutture di attuazione di salita 433. In dettaglio, le strutture di attuazione di salita 433 sono
15 vincolate ciascuna ad una rispettiva prima regione di ancoraggio 117 tramite la rispettiva struttura di giunzione 439 e la rispettiva struttura di attuazione di discesa 436. Di conseguenza, le estremità di giunzione G2 delle strutture di attuazione di salita 433 non si muovono, mentre le
20 estremità libere M si muovono, similmente a quanto discusso in riferimento alla figura 11. Le estremità libere M si spostano in una direzione di salita lungo il terzo asse Z, in particolare verso l'alto.

 Di conseguenza, anche le strutture di disaccoppiamento
25 150 e le strutture di irrigidimento 155 traslano lungo la

direzione di salita e, come sopra descritto e mostrato in figura 12, la massa mobile 120 subisce una traslazione lungo la prima direzione di movimento M_1 , parallelamente al secondo asse Y.

5 In una seconda condizione di funzionamento, una seconda tensione di polarizzazione, rispetto alla tensione di riferimento, è applicata agli elementi piezoelettrici di attuazione di discesa 442, mentre gli elementi piezoelettrici di attuazione di salita 440 sono mantenuti
10 alla tensione di riferimento.

 Come mostrato in figura 14, la seconda tensione di polarizzazione causa una deformazione, in particolare un incurvamento, degli elementi piezoelettrici di attuazione di discesa 442 e quindi delle strutture di attuazione di discesa
15 436, ad essi solidali.

 In dettaglio, in ciascuna struttura di attuazione di discesa 436, l'estremità fissa F non si sposta, dal momento che è vincolata alla rispettiva prima regione di ancoraggio 117, e l'estremità di giunzione G1 ruota (in figura 14 in
20 senso antiorario), spostandosi verso l'alto.

 Conseguentemente, anche l'estremità di giunzione G2 della rispettiva struttura di attuazione di salita 433 si sposta, ruotando, verso l'alto.

 Dato che la struttura di attuazione di salita 433 rimane
25 non deformata e mantiene un profilo rettilineo, essa ruota,

portando la propria estremità libera M verso il basso.

In pratica, tutte le estremità libere M delle strutture di attuazione di salita 433 si abbassano, lungo il terzo asse Z, rispetto alla posizione di riposo, avvicinandosi al substrato 105. Le estremità libere M si portano quindi
5 ciascuna ad una distanza Z_D dalle rispettive estremità fisse F, lungo il terzo asse Z. Ad esempio, la distanza Z_D può essere compresa tra $1\text{ }\mu\text{m}$ e $200\text{ }\mu\text{m}$.

Conseguentemente, anche la rispettiva struttura di
10 disaccoppiamento 150 e la rispettiva struttura di irrigidimento 155 si spostano verso il basso, lungo il terzo asse Z.

Come mostrato in figura 15, le strutture di irrigidimento 155 si portano tutte ad una distanza di lavoro
15 di discesa H_D dal substrato 105, minore della distanza di riposo H_1 .

Per chiarezza, in figura 15, le strutture di irrigidimento 155, la massa mobile 120 e le strutture elastiche di conversione 160 sono disegnate con una linea
20 continua per indicarne la rispettiva posizione nella seconda condizione di funzionamento, e con una linea tratteggiata per indicarne la rispettiva posizione di riposo.

L'abbassamento delle strutture di irrigidimento 155 genera una forza verticale di discesa, la quale è parallela
25 al terzo asse Z e diretta verso il substrato 105; ovvero la

forza verticale di discesa è opposta alla forza di lavoro generata nella prima condizione di funzionamento sopra discussa.

La forza verticale di discesa è quindi, anche nella
5 seconda condizione di funzionamento, trasversale agli assi principali di inerzia delle sezioni delle strutture elastiche di conversione 160 (figura 9), ma di verso opposto rispetto alla forza verticale di salita. La forza verticale di discesa causa quindi una corrispondente flessione deviata
10 delle porzioni intermedie delle strutture elastiche di conversione 160 tale per cui ciascuna sezione intermedia subisce una traslazione parallela al terzo asse Z, una traslazione parallela al secondo asse Y e una rotazione nel piano YZ, ciascuna avente verso opposto rispetto a quanto
15 descritto con riferimento alla figura 12.

In dettaglio, le porzioni intermedie della prima e della seconda porzione 160A, 160B delle strutture elastiche di conversione 160 traslano, lungo il terzo asse Z, verso il substrato 105 e, parallelamente al secondo asse Y, lungo una
20 seconda direzione di movimento M_2 (mostrata schematicamente da una freccia in figura 15), la quale è opposta alla prima direzione di movimento M_1 di figura 12.

Di conseguenza, anche la massa mobile 120 (che non può muoversi parallelamente al terzo asse Z, ovvero
25 perpendicolarmente al suo piano di giacitura, a causa delle

strutture di vincolo 123A, 123B) subisce una traslazione parallelamente al secondo asse Y, lungo la seconda direzione di movimento M_2 .

In pratica, l'attuatore MEMS 400 permette di spostare
5 la massa mobile 120 parallelamente al secondo asse Y, lungo due direzioni opposte, anche se le regioni piezoelettriche 139 dei primi e dei secondi elementi piezoelettrici di attuazione 440, 442 sono formate da uno stesso materiale piezoelettrico, quale il PZT, che è soggetto ad uno stress
10 tensile, indipendentemente dal verso della tensione di polarizzazione applicata.

La figura 16 mostra una differente forma di realizzazione del presente attuatore MEMS, qui indicato da 450. L'attuatore MEMS 450 ha una struttura generale simile
15 all'attuatore MEMS 100 di figura 3; di conseguenza, elementi in comune sono indicati dagli stessi numeri di riferimento e non sono ulteriormente descritti.

L'attuatore MEMS 450 è formato nel corpo 101 comprendente il substrato 105, il corpo strutturale 107 e il
20 corpo di supporto 110, qui non mostrato.

La regione sospesa 115 del corpo strutturale 107 forma anche qui la massa mobile 120, le strutture di vincolo 123A, 123B, le strutture di trasformazione 126A-126D e le strutture di attuazione 130A-130D. Di conseguenza, anche qui tali
25 strutture sono monolitiche fra loro e alle prime e seconde

regioni di ancoraggio 117, 118.

In questa forma di realizzazione, il corpo strutturale 107 forma anche terze regioni di ancoraggio 459.

In questa forma di realizzazione, l'attuatore MEMS 450
5 comprende anche un gruppo di elementi di rilevamento 455, uno per ciascuna struttura di attuazione 130A-130D.

Gli elementi di rilevamento 455 sono costituiti ciascuno da un sensore piezoresistivo, formato nella regione sospesa 115 del corpo strutturale 107.

10 Qui, gli elementi di rilevamento 455 hanno forma di L in vista in pianta dall'alto e comprendono ciascuno una prima estremità accoppiata ad una rispettiva terza regione di ancoraggio 459 e una seconda estremità accoppiata alla rispettiva struttura di attuazione 130A-130D.

15 Nell'esempio di realizzazione mostrato, ciascun elemento di rilevamento 455 ha un primo braccio 456 estendentesi lungo un lato lungo della rispettiva struttura di attuazione 130A-130D ed un secondo braccio 457 trasversale, in particolare perpendicolare, al primo braccio
20 456 e accoppiato alla rispettiva terza porzione di ancoraggio 459.

Ciascun elemento di rilevamento 455 ha, a riposo, una resistenza elettrica di riposo.

In uso, la deformazione delle strutture di attuazione
25 130A-130D genera uno stress meccanico negli elementi di

rilevamento 455. Lo stress meccanico modifica la resistenza elettrica di riposo.

Apposite connessioni elettriche, qui non mostrate, collegano gli elementi di rilevamento 455 con un circuito
5 esterno di misura, configurato per misurare il livello di variazione della resistenza elettrica di riposo. Confrontando tale variazione di resistenza con tabelle ottenute in fase di calibrazione, è possibile convertire la variazione di resistenza in un livello di deformazione delle
10 strutture di attuazione 130A-130D e/o di spostamento della massa mobile 120. Tale livello di deformazione può essere confrontato con valori desiderati di deformazione delle strutture di attuazione 130A-130D e/o dei movimenti desiderati della massa mobile 120.

15 In pratica, l'attuatore MEMS 450 è in grado di fornire un sistema di controllo ad anello chiuso dello spostamento della massa mobile 120. L'attuatore MEMS 450 permette quindi un miglior controllo della traslazione della massa mobile 120.

20 La figura 17 mostra una ulteriore forma di realizzazione del presente attuatore MEMS, qui indicato da 500. L'attuatore MEMS 500 ha una struttura generale simile all'attuatore MEMS 450 di figura 16; di conseguenza, elementi in comune sono indicati dagli stessi numeri di riferimento e non sono
25 ulteriormente descritti.

L'attuatore MEMS 500 è formato nel corpo 101 comprendente il substrato 105, il corpo strutturale 107 e il corpo di supporto 110, qui non mostrato.

La regione sospesa 115 del corpo strutturale 107 forma
5 anche qui la massa mobile 120, le strutture di vincolo 123A, 123B, le strutture di trasformazione 126A-126D, le strutture attuazione 130A-130D ed elementi di rilevamento, qui indicati da 505. Inoltre, anche qui tali strutture sono monolitiche fra loro e alle prime e seconde regioni di
10 ancoraggio 117, 118.

In questa forma di realizzazione, gli elementi di rilevamento 505 sono di tipo piezoelettrico e sono portati ciascuno da una rispettiva struttura di attuazione 130A-130D.

15 Ciascun elemento di rilevamento 505 è formato da una pila di strati analoga a quella degli elementi piezoelettrici di attuazione 135 di figura 4 e dunque qui non ulteriormente mostrata.

In dettaglio, la regione piezoelettrica di ciascun
20 elemento di rilevamento 505 può essere dello stesso materiale piezoelettrico della regione piezoelettrica 139 oppure di un materiale diverso, ad esempio AlN.

Specifiche piste di collegamento elettrico collegano gli elettrodi inferiori e superiori degli elementi di
25 rilevamento 505 ad un circuito esterno di misura.

In uso, la deformazione delle strutture di attuazione 130A-130D causa una deformazione anche degli elementi di rilevamento 520, in particolare delle rispettive regioni piezoelettriche, ad esse solidali. Tale deformazione genera
5 una tensione di rilevamento tra l'elettrodo inferiore e l'elettrodo superiore dell'elemento di rilevamento 505, la quale può essere misurata dal circuito esterno di misura.

L'entità della tensione di rilevamento dipende dall'entità della deformazione della struttura di
10 rilevamento 130. Tramite apposite tabelle di conversione, ottenute ad esempio in una fase calibrazione, è possibile convertire il valore della tensione di rilevamento in un valore di deformazione delle strutture di rilevamento 130A-130D e/o di traslazione della massa mobile 120.

15 In pratica, anche l'attuatore MEMS 500 fornisce un sistema di controllo ad anello chiuso. In particolare, il fatto che gli elementi di rilevamento funzionino attraverso un principio di rilevamento piezoelettrico permette di ridurre il consumo energetico dell'attuatore MEMS 500.

20 La figura 18 mostra una ulteriore forma di realizzazione del presente attuatore MEMS, qui indicato da 550. L'attuatore MEMS 550 ha una struttura generale simile all'attuatore MEMS 100 di figura 3; di conseguenza, elementi in comune sono indicati dagli stessi numeri di riferimento e non sono
25 ulteriormente descritti.

L'attuatore MEMS 550 è formato nel corpo 101
comprendente il substrato 105, il corpo strutturale 107 (qui
colorato per chiarezza) e il corpo di supporto 110, qui non
mostrato. Quindi, anche qui, le strutture formate dal corpo
5 di supporto 110 sono monolitiche fra loro.

In questa forma di realizzazione, la regione sospesa
115 del corpo strutturale 107 forma due strutture di
attuazione, in seguito indicate come prima e seconda
struttura di attuazione 555A, 555B. La prima e la seconda
10 struttura di attuazione 555A, 555B si estendono lateralmente
al primo, rispettivamente al secondo lato L1, L2 della massa
mobile 120 e sono reciprocamente opposte rispetto all'asse
di simmetria S.

La regione sospesa 115 del corpo strutturale 107 forma
15 una prima e una seconda struttura elastica di vincolo, qui
indicate rispettivamente da 560A e 560B, le quali si
estendono ciascuna tra una rispettiva seconda regione di
ancoraggio 118 e il terzo lato L3, rispettivamente il quarto
lato L4 della massa mobile 120, parallelamente al primo asse
20 X.

L'attuatore MEMS 550 comprende inoltre due strutture di
trasformazione, qui di seguito indicate come prima e seconda
struttura di trasformazione 565A e 565B. Ciascuna struttura
di trasformazione 565A e 565B comprende anche qui una
25 struttura elastica di conversione, indicata da 570, e una

struttura di disaccoppiamento, qui indicata da 575.

In questa forma di realizzazione, la prima e la seconda struttura di trasformazione 565A, 565B condividono una stessa struttura di irrigidimento, qui indicata da 580.

5 La struttura di irrigidimento 580 forma una cornice che circonda la massa mobile 120. In dettaglio, la struttura di irrigidimento 580 comprende un primo e un secondo braccio 580A, 580B tra loro paralleli, estendentisi parallelamente al primo asse X, e un terzo e un quarto braccio 580C, 580D,
10 tra loro paralleli, estendentisi parallelamente al secondo asse Y.

La struttura elastica di conversione 570 della prima struttura di trasformazione 565A si estende tra il primo braccio 580A della struttura di irrigidimento 580 e il terzo
15 lato L3 della massa mobile 120. La struttura elastica di conversione 570 della seconda struttura di trasformazione 565B si estende tra il secondo braccio 580B della struttura di irrigidimento 580 e il quarto lato L4 della massa mobile 120.

20 Anche qui, le strutture elastiche di conversione 570 sono formate ciascuna da una rispettiva prima e una rispettiva seconda porzione 160A, 160B. La prima e la seconda porzione 160A, 160B sono formate ciascuna da una rispettiva porzione allungata superiore 170, una rispettiva porzione
25 allungata inferiore 175, e una pluralità di porzioni

trasversali 180, così come descritto in riferimento alla figura 7.

In questa forma di realizzazione, la struttura elastica di conversione 570 della prima struttura di trasformazione 565A comprende due porzioni di collegamento 590, le quali accoppiano la rispettiva porzione allungata superiore 170 alla struttura di irrigidimento 580. In dettaglio, le porzioni di collegamento 590 collegano rigidamente rispettive estremità della porzione allungata superiore 170 al primo braccio 580A della struttura di irrigidimento 580.

La struttura elastica di conversione 570 della seconda struttura di trasformazione 565B comprende due porzioni di collegamento 595, le quali accoppiano la rispettiva porzione allungata inferiore 175 alla struttura di irrigidimento 580. In dettaglio, la prima e la seconda porzione di collegamento 595A, 595B collegano rigidamente rispettive estremità della porzione allungata inferiore 175 alla seconda porzione 580B della struttura di irrigidimento 580.

In uso, una tensione di polarizzazione applicata agli elementi piezoelettrici di attuazione 135 causa una traslazione della massa mobile 120 parallelamente al secondo asse Y, come sopra discusso per l'attuatore MEMS 100 di figura 3.

La struttura di irrigidimento 580 conferisce una maggiore rigidità all'attuatore MEMS 550 rispetto

all'attuatore MEMS 100 di figura 3. Infatti, la struttura di irrigidimento 580 ha una forma a cornice e forma una unica struttura che è condivisa dalla prima e dalla seconda struttura di trasformazione 565A, 565B. Ciò garantisce che le porzioni di collegamento 590 della struttura elastica di conversione 570 della prima struttura di trasformazione 565A subiscano uno stesso spostamento verticale, lungo il terzo asse Z, rispetto alle porzioni di collegamento 595 della struttura elastica di conversione 570 della seconda struttura di trasformazione 565B. Di conseguenza, le strutture elastiche di conversione 570 della prima e della seconda struttura di trasformazione 565A, 565B garantiscono una maggiore accuratezza di spostamento della massa mobile 120.

L'attuatore MEMS 550 ha quindi migliorate prestazioni meccaniche.

Come mostrato nelle figure 19 e 20, gli attuatori MEMS 100, 400 450, 500 e 550 possono essere utilizzati per formare un modulo ottico 220, il quale può essere integrato in un apparecchio 230. L'apparecchio 230 comprende inoltre una unità di controllo 240, la quale è accoppiata al modulo ottico 220, ed è utilizzabile per scansionare un oggetto 250 posto a distanza dall'apparecchio 230, e ricostruirne una struttura tridimensionale. In dettaglio, l'unità di controllo 240 comprende un circuito di polarizzazione 241,

configurato per applicare una tensione di polarizzazione agli elementi piezoelettrici di attuazione 135, e un circuito di misura di tempo di volo 242.

In dettaglio, la figura 20 mostra una sezione trasversale del modulo ottico 220. A puro titolo esemplificativo, il modulo ottico 220 di figura 20 è formato a partire dall'attuatore MEMS 100 di figura 3 e ne mostra una sezione presa lungo il piano di simmetria S.

Il modulo ottico 220 comprende una sorgente di luce 255, un rilevatore ottico 260, un elemento ottico di trasmissione 265 e un elemento ottico di ricezione 270. La sorgente di luce 255 e il rilevatore ottico 260 sono portati dal substrato 105; l'elemento ottico di trasmissione 265 e l'elemento ottico di ricezione 270 sono portati dalla massa mobile 120.

In dettaglio, la sorgente di luce 255 e il rilevatore ottico 260 sono disposti sulla prima superficie 105A del substrato 105, affacciati alla massa mobile 120.

La sorgente di luce 255 e il rilevatore ottico 260 possono essere formati ciascuno in una rispettiva piastrina ("die") di materiale semiconduttore e incollati sul substrato 105, in particolare sulla superficie 105A, durante fasi finali ("back-end") di fabbricazione.

La sorgente di luce 255 può essere formata, ad esempio, da uno o più sorgenti laser a cavità verticale a emissione

superficiale ("Vertical Cavity Surface Emitting Lasers", VCSELs) 256. In questa forma di realizzazione, come mostrato in vista in pianta dall'alto in figura 21, la sorgente di luce 255 comprende una pluralità di sorgenti VCSEL 256
5 disposte allineate, a una distanza reciproca lungo il secondo asse Y, in modo da formare un array monodimensionale.

In uso, il circuito di misura di tempo di volo 242 comanda le sorgenti VCSEL 256 affinché generino ciascuna un rispettivo fascio di luce iniziale 280, ad esempio
10 nell'infrarosso, che si propaga verso la massa mobile 120, lungo il terzo asse Z (figura 20), come indicato da linee tratteggiate.

Il rilevatore ottico 260 può essere formato da una pluralità di fotorivelatori, quali ad esempio diodi a valanga
15 a singolo fotone ("Single-Photon Avalanche Diodes", SPADs), i quali sono disposti in modo da formare una matrice bidimensionale di rilevazione nel piano XY. Come noto, ciascun fotorivelatore, quando colpito da un fascio di luce, converte il fascio di luce in un rispettivo segnale elettrico
20 e lo invia al circuito di misura di tempo di volo 242 tramite apposite connessioni elettriche, per una successiva elaborazione.

L'elemento ottico di trasmissione 265 e l'elemento ottico di ricezione 270 sono elementi ottici diffrattivi,
25 quali ad esempio lenti diffrattive multilivello o metalenti.

In figura 20, per semplicità, l'elemento ottico di trasmissione 265 e l'elemento ottico di ricezione 270 sono mostrati come formati sulla prima superficie 107A del corpo strutturale 107, in particolare sulla massa mobile 120.

5 Tuttavia, l'elemento ottico di trasmissione 265 e l'elemento ottico di ricezione 270 possono essere formati ciascuno in una rispettiva porzione della massa mobile 120, ad esempio tramite specifiche tecniche di fabbricazione, in modo da formare un reticolo di diffrazione.

10 L'elemento ottico di trasmissione 265 è disposto sopra, verticalmente allineato lungo l'asse Z con la sorgente di luce 255 ed è configurato per modificare la forma dei fasci iniziali di luce 280. In dettaglio, l'elemento ottico di trasmissione 265 collima ciascun fascio iniziale di luce 280
15 lungo una direzione di propagazione, qui il terzo asse Z, ed espande ciascun fascio iniziale di luce 280 lungo una direzione perpendicolare alla direzione di propagazione, qui il primo asse X.

In altre parole, i fasci iniziali di luce 280 formano,
20 in uscita dall'elemento ottico di trasmissione 265, un fascio di trasmissione 290 formato da una pluralità di strisce di luce, una per ogni sorgente VCSEL 256, le quali sono allungate parallelamente al primo asse X e si propagano parallelamente al terzo asse Z.

25 L'elemento ottico di ricezione 270 è disposto sopra il

rilevatore ottico 260 ed è configurato per focalizzare un fascio di luce incidente su di esso verso il rilevatore ottico 260.

In uso, il fascio di trasmissione 290 si propaga in allontanamento dall'apparecchio ottico 230 e incide su una prima porzione dell'oggetto 250 (figura 19). La prima porzione dell'oggetto 250 riflette una parte del fascio di trasmissione 290, formando così un fascio riflesso 300 che si propaga verso l'apparecchio ottico 230.

In dettaglio, ciascuna striscia di luce del fascio di trasmissione 290 viene riflessa da una rispettiva parte della prima porzione dell'oggetto 250. Il fascio riflesso 300 è quindi anch'esso formato da una pluralità di strisce di luce allungate approssimativamente in direzione parallela al primo asse X.

Il fascio riflesso 300 incide sull'elemento ottico di ricezione 270 e viene da esso focalizzato, formando così un fascio focalizzato 310 che incide sul rilevatore ottico 260, formando un pattern di luce, come mostrato in figura 22.

Il rilevatore ottico 260, in particolare i rispettivi fotorivelatori, convertono il fascio focalizzato 310 in una pluralità di segnali elettrici che vengono inviati al circuito di misura di tempo di volo 242.

Il circuito di misura di tempo di volo 242 è configurato per misurare un tempo di volo che intercorre tra la

generazione del fascio di luce iniziale 280 da parte delle sorgenti VCSEL 256, e la ricezione del fascio focalizzato 310, da parte del rilevatore ottico 260.

Il tempo di volo varia in funzione della distanza
5 dell'oggetto 250 dall'apparecchio ottico 230.

In dettaglio, ciascuna striscia di luce generata dall'elemento ottico di trasmissione 265 ha un tempo di volo che dipende dalla distanza della rispettiva parte dell'oggetto 250 su cui ha inciso.

10 A partire dal tempo di volo misurato per ciascun fotorivelatore del rilevatore ottico 260, il circuito di misura di tempo di volo 242 può ottenere una distanza di ciascuna parte della prima porzione dell'oggetto 250 dall'apparecchio 230.

15 Per scansionare interamente l'oggetto 250 il circuito di polarizzazione 241 applica una tensione di polarizzazione agli elementi piezoelettrici di attuazione 135 dell'attuatore MEMS 100, provocando lo spostamento della massa mobile 120 in direzione parallela al secondo asse Y,
20 come sopra discusso in dettaglio.

Di conseguenza, come mostrato in figura 23, lo spostamento della massa mobile 120 modifica la posizione relativa tra l'elemento ottico di trasmissione 265 e la sorgente di luce 255, rispetto alla posizione di riposo di
25 figura 20, causando quindi una deviazione del fascio di

trasmissione 290.

In questo modo, è possibile scansionare l'oggetto 250 in direzione parallela al secondo asse Y.

Il circuito di misura di tempo di volo 242 elabora i
5 valori di tempo di volo misurati per ciascuna porzione scansionata dell'oggetto 250 e genera una ricostruzione tridimensionale dell'oggetto 250.

Come sopra descritto, l'attuatore MEMS 100 permette di ottenere un elevato spostamento in piano, qui lungo il
10 secondo asse Y, della massa mobile 120, utilizzando un'attuazione quasi-statica; ovvero applicando una tensione di polarizzazione continua o una rampa lineare.

Inoltre, è possibile scansionare l'oggetto 250 utilizzando un profilo desiderato di spostamento della massa
15 mobile 120.

Risulta infine chiaro che agli attuatori MEMS 100, 400, 450, 500 e 550, al modulo ottico 200 e all'apparecchio 230 qui descritti ed illustrati possono essere apportate modifiche e varianti senza per questo uscire dall'ambito
20 protettivo della presente invenzione, come definito nelle rivendicazioni allegate.

Ad esempio, la forma delle strutture elastiche di conversione può essere diversa rispetto a quanto descritto.

Inoltre, le strutture elastiche di conversione possono
25 avere un numero diverso di bracci, anche un solo braccio. In

tal caso le strutture elastiche di conversione avrebbero una struttura lineare e non ripiegata.

Il circuito di polarizzazione, che fornisce la tensione di polarizzazione agli elementi di attuazione, e il circuito
5 di misura, che rileva la tensione di rilevamento negli attuatori MEMS 450, 500, possono essere formati su una o più piastrine di materiale semiconduttore, interne o esterne al corpo strutturale 107.

Le sorgenti laser VCSEL 156 possono essere disposte in
10 modo differente sul substrato 105, ad esempio formando una matrice bidimensionale.

La forma della massa mobile 120 può variare rispetto alla forma rettangolare. Ad esempio, essa può presentare lati curvi e/o formati da segmenti e/o porzioni di linee.

15 L'attuatore MEMS 100 di figura 3 potrebbe comprendere due strutture di attuazione estendentesi in posizione adiacente rispettivamente al terzo e al quarto lato L3, L4 della massa mobile 120, parallelamente al secondo asse Y. In tal caso, le strutture di disaccoppiamento si estenderebbero
20 ciascuna tra l'estremità libera della rispettiva struttura di attuazione e la struttura di irrigidimento. In questo caso, inoltre, le strutture di disaccoppiamento potrebbero essere ruotate di 90° attorno al terzo asse Z rispetto alle strutture di disaccoppiamento 150 di figura 3.

25 Inoltre, quando il presente attuatore MEMS è utilizzato

per formare il modulo ottico 220, la massa mobile 120 può essere ulteriormente lavorata, in base ai requisiti della specifica applicazione, in particolare in base alle proprietà ottiche e/o meccaniche desiderate. A tal
5 proposito, il modulo ottico 220 può essere modificato come descritto nella domanda di brevetto US 17124027 depositata il 16 dicembre 2020, in riferimento alle figure 7-15 e come brevemente discusso qui di seguito.

Le figure 24-30 mostrano il presente modulo ottico e il
10 presente attuatore MEMS secondo diverse forme di realizzazione.

Il modulo ottico delle figure 24-30 e i rispettivi attuatori MEMS hanno una struttura generale simile a quella, rispettivamente, del modulo ottico 220 e degli attuatori
15 MEMS 100, 400, 500, 550; di conseguenza, elementi in comune sono indicati dagli stessi numeri di riferimento e non sono ulteriormente descritti.

In dettaglio, l'attuatore MEMS di figura 24, qui indicato da 600, è formato dal substrato 105, dal corpo
20 strutturale 107 e dal corpo di supporto 110. Il corpo strutturale 107 è sagomato per formare le prime regioni di ancoraggio 117, le seconde regioni di ancoraggio (qui non mostrate) e la regione sospesa 115.

La regione sospesa 115 forma anche qui la massa mobile,
25 indicata da 610. Le strutture di trasformazione, di vincolo

e di attuazione sono rappresentate solo schematicamente, per semplicità, da linee tratteggiate tra la massa mobile 610 e le prime regioni di ancoraggio 117.

La massa mobile 610 comprende una porzione centrale
5 615, la quale è stata assottigliata in fase di fabbricazione. Ad esempio, la porzione centrale 615 può avere uno spessore compreso tra 1 μm e 5 μm .

L'elemento ottico di ricezione 270 e l'elemento ottico di trasmissione 265 sono qui formati in un singolo corpo
10 620, ad esempio di silicio, tramite tecniche note di fabbricazione. Il singolo corpo 620 è portato dalla massa mobile 610, ad esempio è incollato sulla massa mobile 610. La sorgente di luce 255 e il rilevatore ottico 260 sono disposti sul substrato 105, affacciati alla porzione
15 centrale 615 della massa mobile 610. In particolare, la sorgente di luce 255 e il rilevatore ottico 260 sono affacciati rispettivamente all'elemento ottico di trasmissione 265 e all'elemento ottico di ricezione 270.

In uso, il fascio di luce generato dalla sorgente di
20 luce 255 e il fascio riflesso focalizzato sul rilevatore ottico 260 dall'elemento ottico di ricezione 270 attraversano la porzione centrale 615 della massa mobile 610. Dal momento che la porzione centrale 615 della massa mobile 610 è sottile, il fascio di luce generato dalla
25 sorgente di luce e il fascio focalizzato dall'elemento ottico

di ricezione 270 subiscono un assorbimento ridotto.

Nell'attuatore MEMS di figura 25, qui indicato da 640, la porzione centrale 615 della massa mobile 610 dell'attuatore MEMS 600 è stata completamente rimossa, ad esempio in modo che la massa mobile 610 formi una cornice. In pratica, la sorgente di luce 255 e il rilevatore ottico 260 sono affacciati direttamente all'elemento ottico di trasmissione 265 e rispettivamente all'elemento ottico di ricezione 270. In uso, quindi, il fascio di luce generato dalla sorgente di luce 255 e il fascio riflesso focalizzato sul rilevatore ottico 260 dall'elemento ottico di ricezione 270 non attraversano la massa mobile 610; essi possono dunque essere soggetti ad un assorbimento ulteriormente ridotto.

Anche nell'attuatore MEMS di figura 26, qui indicato da 650, la porzione centrale 615 della massa mobile 610 dell'attuatore MEMS 600 è stata completamente rimossa. Il modulo ottico 220 comprende qui un substrato ottico 655, ad esempio di vetro, incollato sulla massa mobile 610 in corrispondenza di una propria porzione periferica. Il corpo singolo 620 è incollato sul substrato ottico 655. Il modulo ottico di figura 27, qui indicato da 660, comprende un corpo di incapsulamento 665, ad esempio di vetro, il quale è incollato al corpo strutturale 107. In dettaglio, il corpo di incapsulamento 665 è incollato alla prima superficie 107A delle prime regioni di ancoraggio 117 tramite rispettive

porzioni di incollaggio 670, estendentisi perifericamente. Il corpo di incapsulamento 660 costituisce un elemento di protezione da agenti esterni.

Il modulo ottico di figura 28, qui indicato da 670, comprende un primo corpo di incapsulamento 675, uguale al corpo di incapsulamento 665 del modulo ottico 660 di figura 27, e un secondo corpo di incapsulamento 680. Il secondo corpo di incapsulamento 680, ad esempio di vetro, si estende tra il corpo di supporto 110 e il corpo strutturale 107.

In dettaglio, il secondo corpo di incapsulamento 680 ha una prima faccia incollata ai pilastri 113 del corpo di supporto 110, e una seconda faccia incollata al corpo strutturale 107, in particolare alla seconda superficie 107B delle prime regioni di ancoraggio 117, tramite rispettive porzioni di incollaggio 685.

In pratica, il primo e il secondo corpo di incapsulamento 665, 680 formano un vano 690 che sigilla l'attuatore MEMS 640, in particolare la massa mobile 610. Di conseguenza, è possibile controllare la pressione interna del vano 690, come può essere utile in alcune applicazioni.

Il modulo ottico delle figure 29 e 30, qui indicato da 700, è formato a partire dall'attuatore MEMS 100 di figura 3. Il modulo ottico 700 comprende anche una massa fissa 705, ad esempio formata nel corpo strutturale 107, la quale è separata dall'attuatore MEMS 100. La massa fissa 705 è

sospesa sul substrato 105, è affacciata al rilevatore ottico 260 ed è solidale sui lati ad una rispettiva terza regione di ancoraggio 710. La terza regione di ancoraggio 710 è fissata su rispettivi pilastri 113 del corpo di supporto 110.

Nel modulo ottico 700, l'elemento ottico di trasmissione 265 è portato dalla massa mobile 120, mentre l'elemento ottico di ricezione 270 è portato dalla massa fissa 705. In pratica, in uso, quando viene applicata una tensione di polarizzazione agli elementi piezoelettrici di attuazione 135, solamente l'elemento ottico di trasmissione 265 si sposta, deviando di conseguenza il fascio di luce iniziale, come mostrato in figura 12, mentre l'elemento ottico di ricezione 270 rimane fisso.

Le forme di realizzazione descritte possono essere combinate per formare ulteriori soluzioni.

RIVENDICAZIONI

1. Attuatore MEMS (100; 400; 450; 500; 550; 600; 640; 650) comprendente:

- un substrato (105);

5 - una massa mobile (120; 610), la massa mobile essendo sospesa sul substrato ad una altezza di riposo (H_1) misurata lungo una prima direzione (Z) ed estendendosi principalmente in un piano di estensione definente una seconda direzione (Y) e una terza direzione (X), perpendicolari alla prima
10 direzione;

 - elementi elastici (123A, 123B, 133A, 133B; 560A, 560B), gli elementi elastici essendo interposti tra il substrato e la massa mobile ed avendo una prima cedevolezza, parallelamente alla prima direzione, e una seconda
15 cedevolezza, parallelamente alla seconda direzione (Y), la prima cedevolezza essendo minore della seconda cedevolezza;

 - strutture di attuazione piezoelettrica (130A-130D, 135; 440, 442; 555A, 555B), ciascuna struttura di attuazione piezoelettrica avendo una porzione fissa (F) solidale al
20 substrato ed una porzione mobile (M) configurata per deformarsi in direzione parallela alla prima direzione in presenza di una tensione di attuazione; e

 - strutture di trasformazione movimento (126A-126D; 565A, 565B), ciascuna struttura di trasformazione movimento
25 essendo accoppiata ad una rispettiva struttura di attuazione

piezoelettrica e comprendendo una struttura elastica di conversione movimento (160; 570) interposta fra la rispettiva struttura di attuazione piezoelettrica e la massa mobile, ciascuna struttura elastica di conversione movimento
5 essendo cedevole parallelamente ad un piano di trasformazione movimento (YZ) formato dalla prima e dalla seconda direzione e avendo, nel piano di trasformazione movimento (YZ), un primo asse principale di inerzia (I_1) e un secondo asse di principale inerzia (I_2), il primo e il
10 secondo asse principale di inerzia essendo trasversali rispetto alla prima e alla seconda direzione, in modo tale che una deformazione delle strutture di attuazione piezoelettrica nel piano di trasformazione movimento (YZ) causa un corrispondente movimento della massa mobile lungo
15 la seconda direzione (Y).

2. Attuatore MEMS secondo la rivendicazione precedente, in cui in cui la massa mobile (120; 610) ha un primo lato (L1) e un secondo lato (L2), opposti rispetto ad un piano mediano (S) parallelo al piano di trasformazione
20 movimento (YZ), ed un terzo lato (L3) e un quarto lato (L4), opposti rispetto ad un asse mediano parallelo alla terza direzione (X), in cui gli elementi elastici (123A, 123B) sono disposti adiacenti al primo e rispettivamente al secondo lato della massa mobile e le strutture di trasformazione
25 movimento (126A-126D; 565A, 565B) sono disposte adiacenti al

terzo e rispettivamente al quarto lato della massa mobile.

3. Attuatore MEMS secondo la rivendicazione precedente, in cui le strutture elastiche di conversione movimento (160; 570) delle strutture di trasformazione movimento adiacenti al terzo e al quarto lato della massa mobile presentano forma uguale tra loro e traslata lungo la seconda direzione (Y).

4. Attuatore MEMS secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui ciascuna struttura elastica di conversione movimento (160; 570) comprende almeno una struttura allungata (160A, 160B) includente una prima porzione allungata (170), una seconda porzione allungata (175) e una pluralità di porzioni trasversali (180), la prima porzione allungata e la seconda porzione allungata estendendosi, a riposo, generalmente parallele fra loro e alla terza direzione (X), ed essendo disposte ad una altezza differente dal substrato lungo la prima direzione (Z), ciascuna porzione trasversale estendendosi tra la prima porzione allungata e la seconda porzione allungata.

5. Attuatore MEMS secondo la precedente, in cui l'almeno una struttura allungata è una prima struttura allungata (160A) e ciascuna struttura elastica di conversione (160; 570) comprende anche una seconda struttura allungata (160B) accoppiata alla prima struttura allungata formante, in vista dall'alto dell'attuatore MEMS, una molla

ripiegata.

6. Attuatore MEMS secondo la rivendicazione precedente, in cui la seconda struttura allungata è uguale alla prima struttura allungata e traslata lungo la seconda
5 direzione (Y).

7. Attuatore MEMS secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui gli elementi elastici (123A, 123B; 560A, 560B) e le strutture di conversione movimento (160; 570) sono rigide rispetto alla terza
10 direzione (X).

8. Attuatore MEMS secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui le strutture di attuazione piezoelettrica (130A-130D) si estendono parallelamente alla terza direzione (X) e hanno una estremità libera (M), in cui
15 le strutture di trasformazione movimento (126A-126D; 565A, 565B) comprendono inoltre ciascuna una struttura elastica di traslazione (150, 155) estendentesi tra l'estremità libera di una rispettiva struttura di attuazione piezoelettrica e una prima estremità (E1) di una rispettiva struttura elastica
20 di conversione movimento (160; 570), ciascuna struttura elastica di traslazione essendo configurata per trasferire un movimento dell'estremità libera (M) della rispettiva struttura deformabile (130A-130D; 430A-430D) in una traslazione della prima estremità (E1) della rispettiva
25 struttura elastica di conversione movimento, parallelamente

alla prima direzione (Z).

9. Attuatore MEMS secondo la rivendicazione precedente, in cui ciascuna struttura elastica di traslazione comprende una struttura elastica di disaccoppiamento (150) e una struttura di irrigidimento (155; 580), la struttura elastica di disaccoppiamento essendo configurata per deformarsi in direzione parallela alla prima direzione (Z) e alla terza direzione (X), in cui la struttura di irrigidimento (155) si estende lungo la terza
10 direzione (X) fra la struttura elastica di disaccoppiamento (150) e la struttura elastica di conversione movimento (160; 570).

10. Attuatore MEMS (550) secondo la rivendicazione precedente, in cui la struttura di irrigidimento (580) forma
15 una cornice che circonda la massa mobile (120) e le strutture elastiche di conversione movimento, le strutture elastiche di conversione movimento essendo solidali alla cornice, ciascuna struttura di disaccoppiamento (150) e ciascuna struttura di attuazione piezoelettrica (555A, 555B) essendo
20 disposta esternamente rispetto alla cornice.

11. Attuatore MEMS (400) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui le strutture di attuazione piezoelettrica (430A-430D) comprendono ciascuna una prima porzione (433) e una seconda porzione (436) accoppiata alla
25 prima porzione, la prima e la seconda porzione avendo

struttura allungata ed estendendosi parallelamente fra loro, la prima porzione (433) essendo accoppiata ad una rispettiva struttura di trasformazione movimento (126A-126D; 565A, 565B), la seconda porzione (436) essendo accoppiata al substrato, la prima e la seconda porzione essendo collegate a strutture di polarizzazione distinte e configurate per deformarsi nella prima direzione e, rispettivamente, in una quarta direzione parallela alla prima direzione e di verso opposto.

12. Attuatore MEMS (450; 500) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre un gruppo di elementi di rilevamento (455; 505), i quali sono accoppiati alle strutture di attuazione piezoelettrica (130A-130D), ad esempio di tipo piezoelettrico o piezoresistivo.

13. Attuatore MEMS secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui la massa mobile (120), gli elementi elastici (123), le strutture di attuazione piezoelettrica (130A-130D; 430A-430D; 555A, 555B) e le strutture di trasformazione movimento (126A-126D; 565A-565B) sono formate da un corpo monolitico (107) sostanzialmente planare, a riposo, comprendente uno strato di materiale semiconduttore.

14. Modulo ottico (220; 660; 670) comprendente:

- l'attuatore MEMS secondo una qualsiasi delle

rivendicazioni precedenti;

- una sorgente di luce (255) portata dal substrato (105) dell'attuatore MEMS e configurata per generare un fascio di luce iniziale propagante verso la massa mobile (120; 610);

5 -un rilevatore ottico (260) portato dal substrato dell'attuatore MEMS e configurato per rilevare un fascio di luce di ingresso, incidente sul modulo ottico;

- un elemento ottico di uscita (265) portato dalla massa mobile (120; 610) e affacciato sulla sorgente di luce, 10 l'elemento ottico di uscita essendo configurato per modificare una direzione di propagazione del fascio di luce iniziale in funzione di una posizione relativa tra la sorgente di luce e l'elemento ottico di uscita, generando un fascio di luce di uscita;

15 -un elemento ottico di ingresso (270), configurato per focalizzare sul rilevatore ottico il fascio di luce di ingresso.

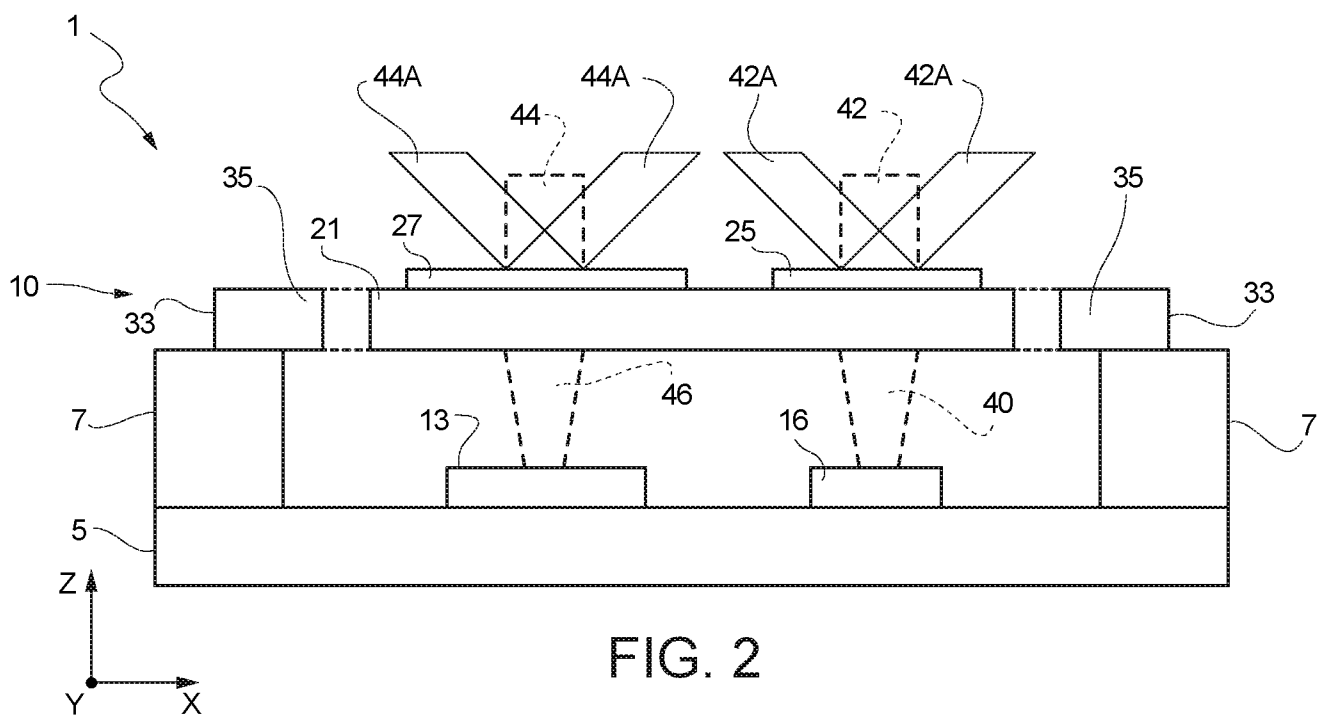
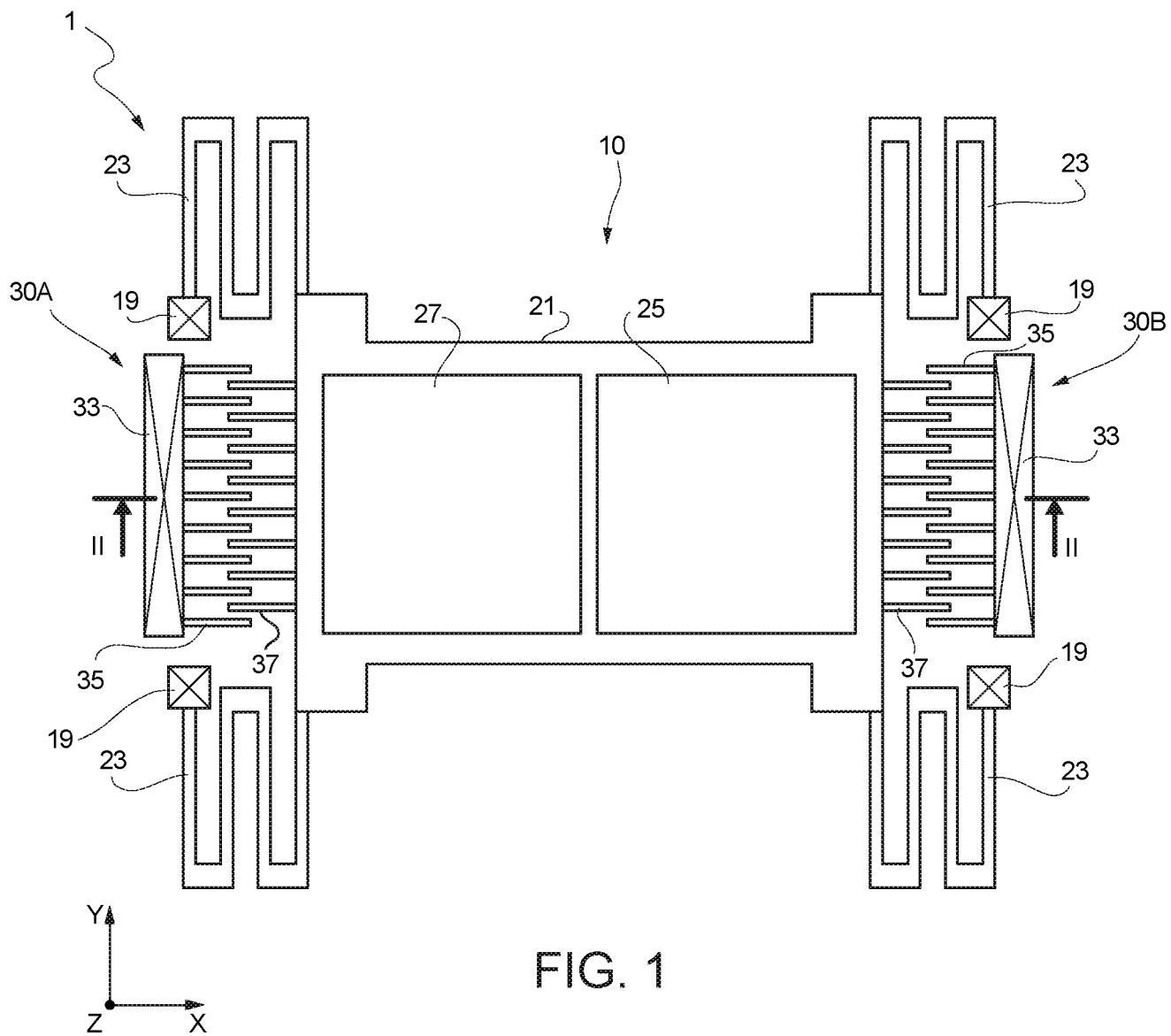
15. Apparecchio (230) per scansionare tramite un fascio di luce un oggetto (250) disposto a distanza 20 dall'apparecchio, l'apparecchio comprendendo:

- il modulo ottico secondo la rivendicazione precedente;

- un primo circuito (242), configurato per misurare un tempo di volo tra l'emissione del fascio di luce iniziale e la ricezione di un fascio di luce riflesso; e

25 - un secondo circuito (241), configurato per applicare

una tensione di polarizzazione alle strutture di attuazione piezoelettrica (135; 440, 442) dell'attuatore MEMS, la tensione di polarizzazione causando uno spostamento della massa mobile lungo la seconda direzione (Y), in cui lo
5 spostamento della massa mobile varia la posizione relativa tra l'elemento ottico di uscita (265) e la sorgente di luce (255), modificando quindi la direzione di propagazione del fascio di luce di uscita.



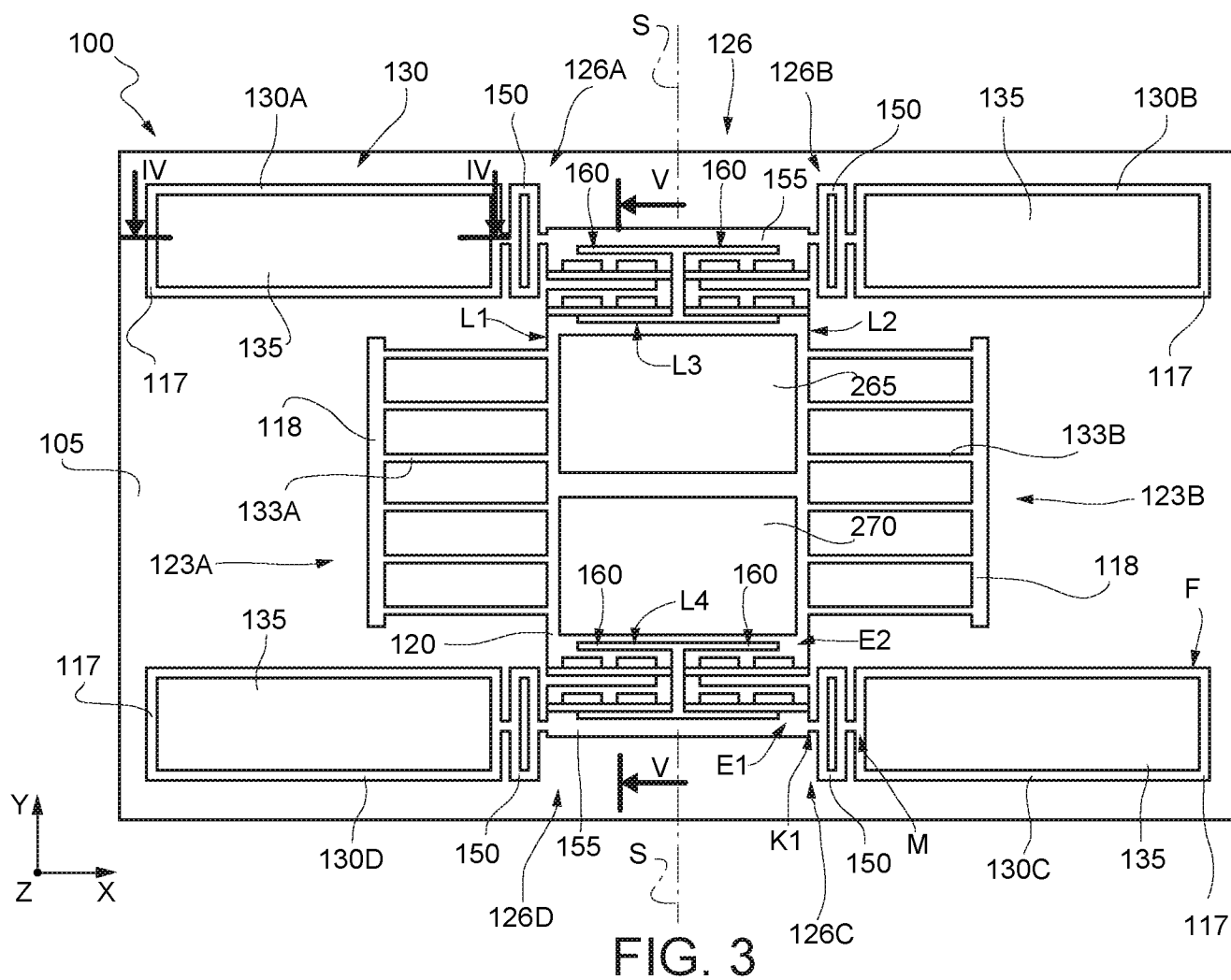


FIG. 3

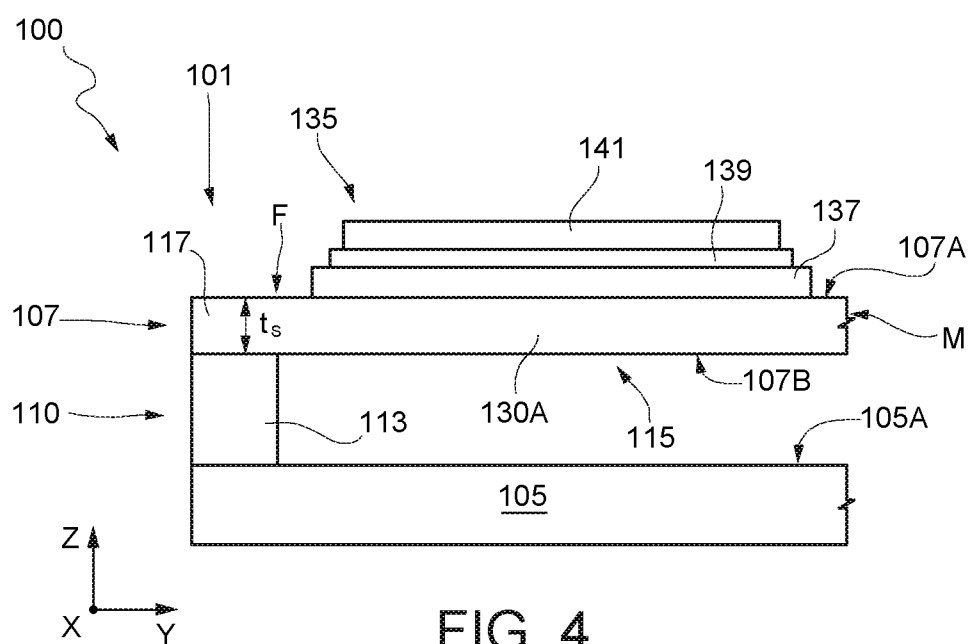


FIG. 4

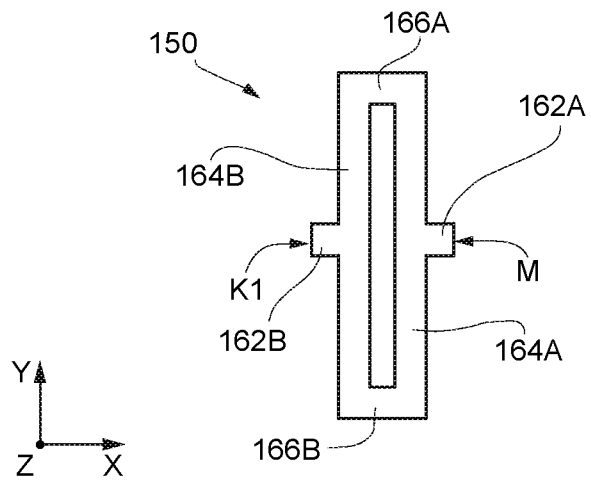


FIG. 6

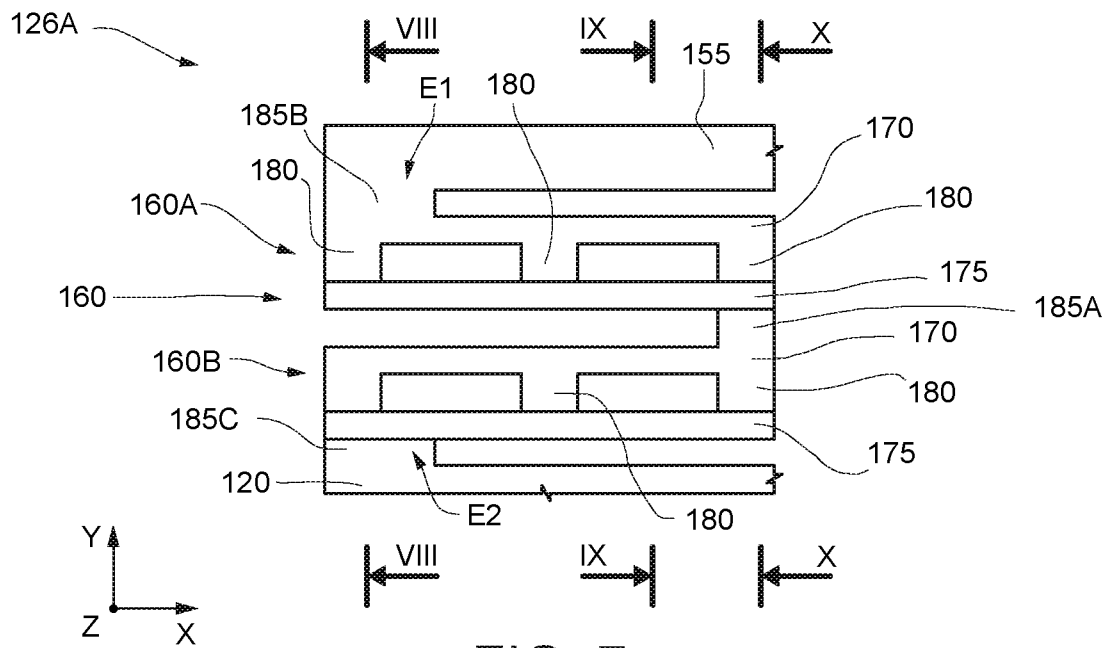


FIG. 7

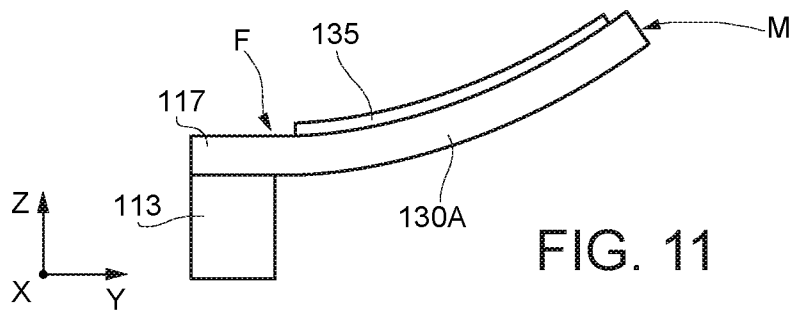


FIG. 11

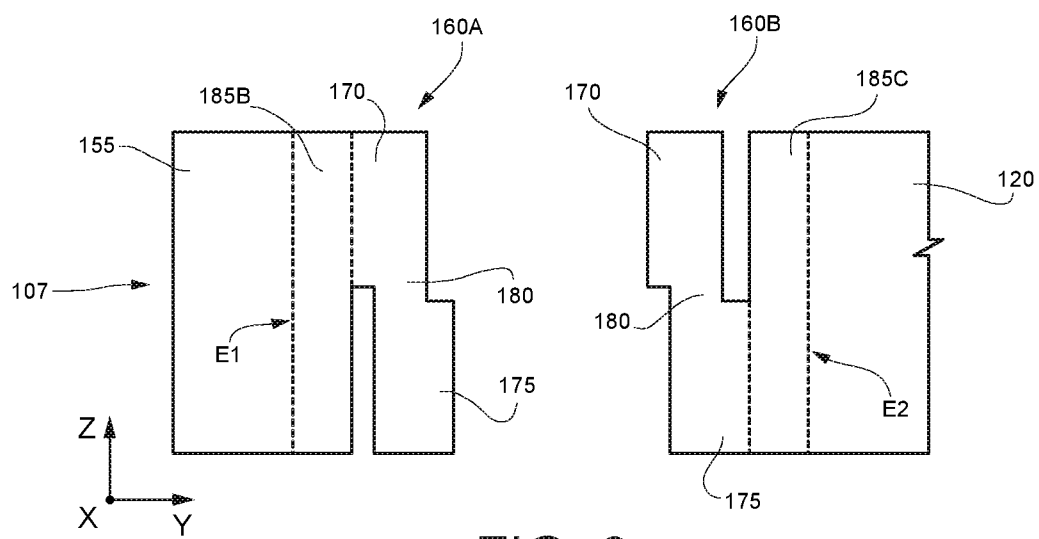


FIG. 8

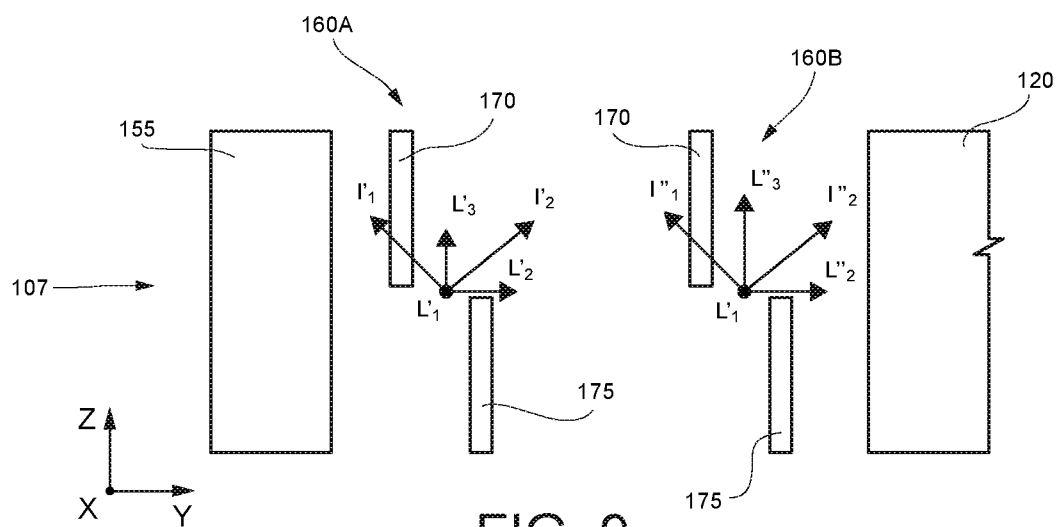


FIG. 9

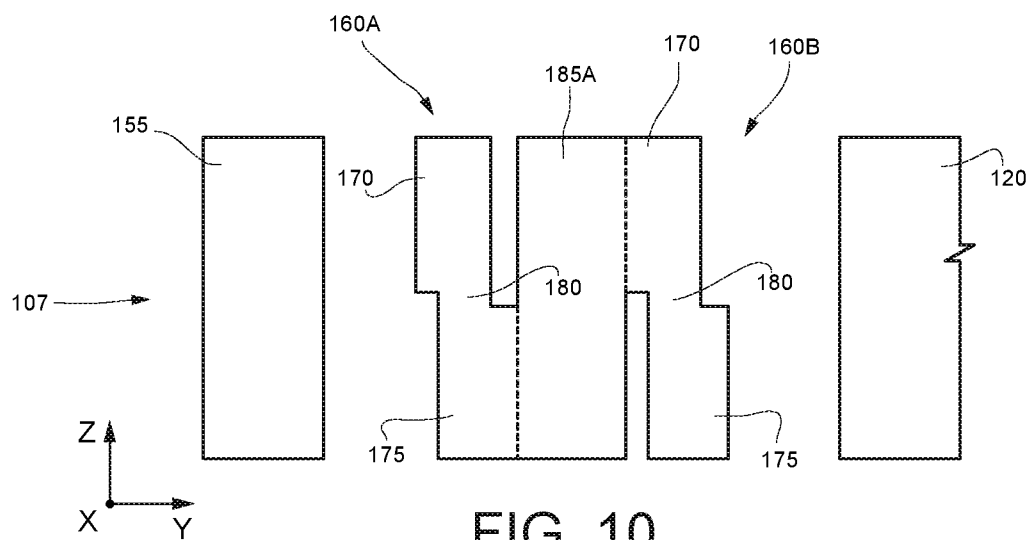
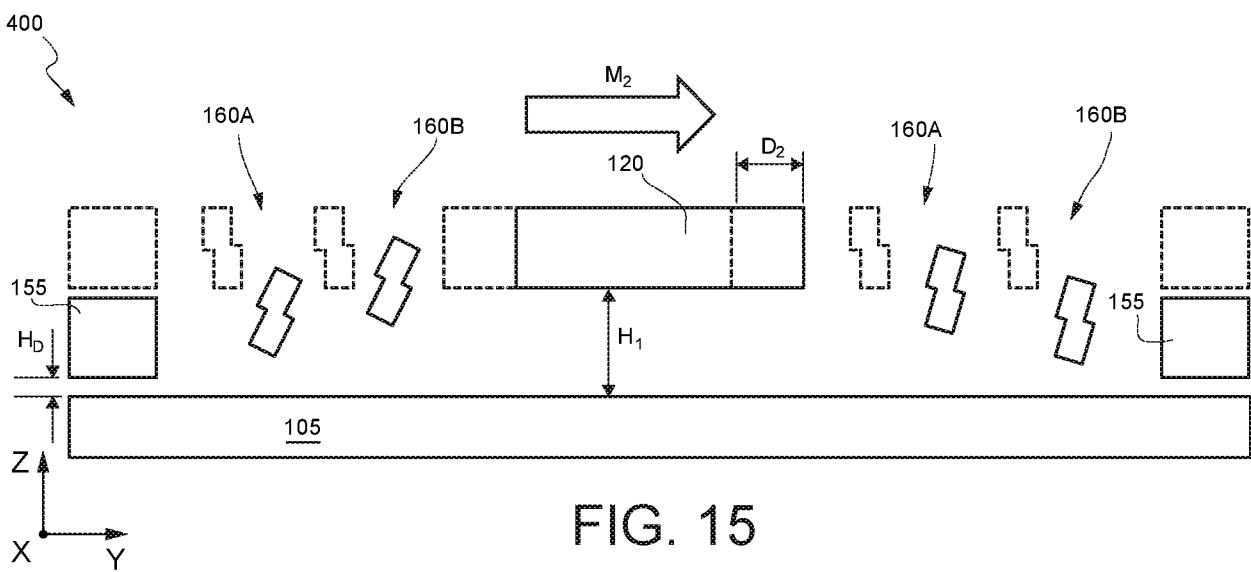
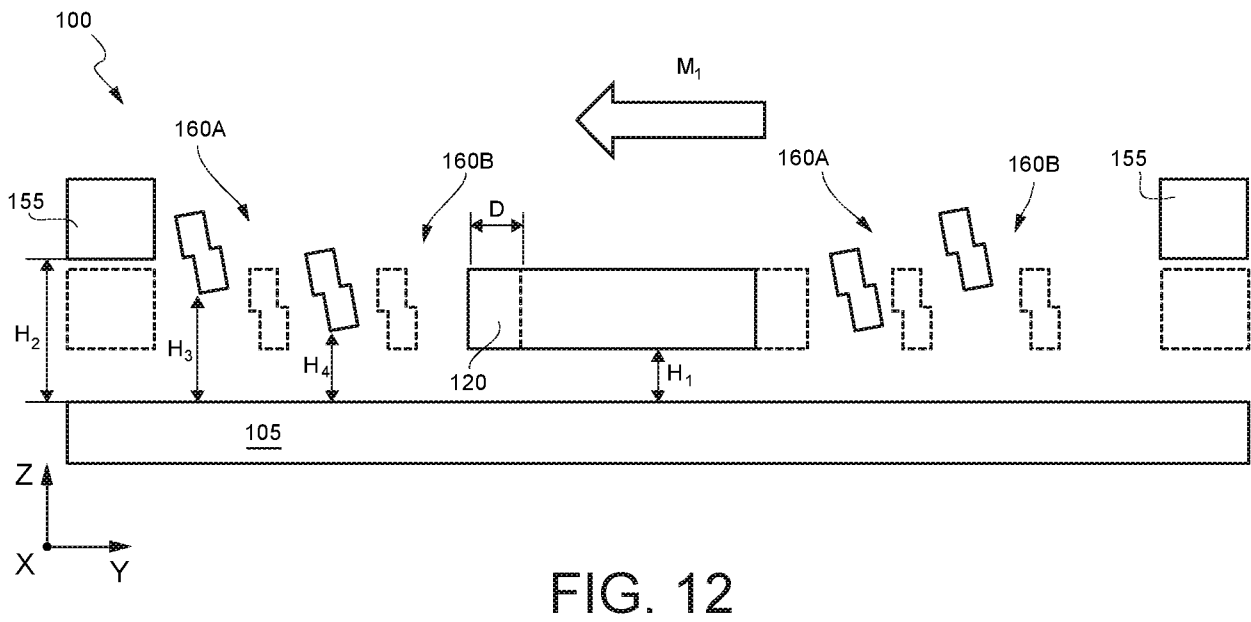
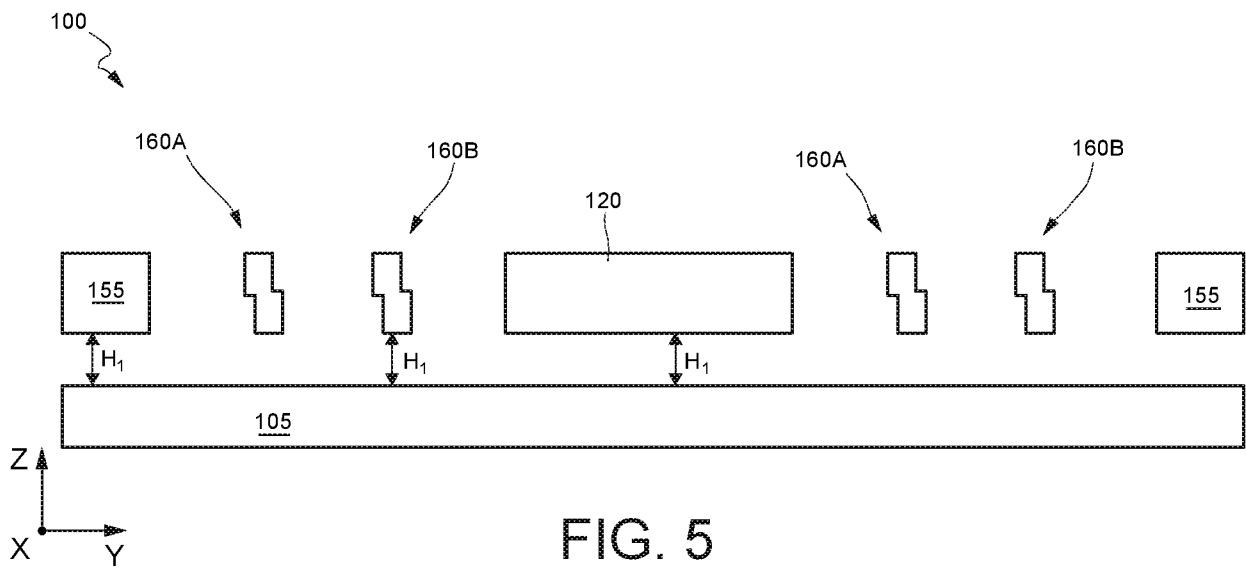
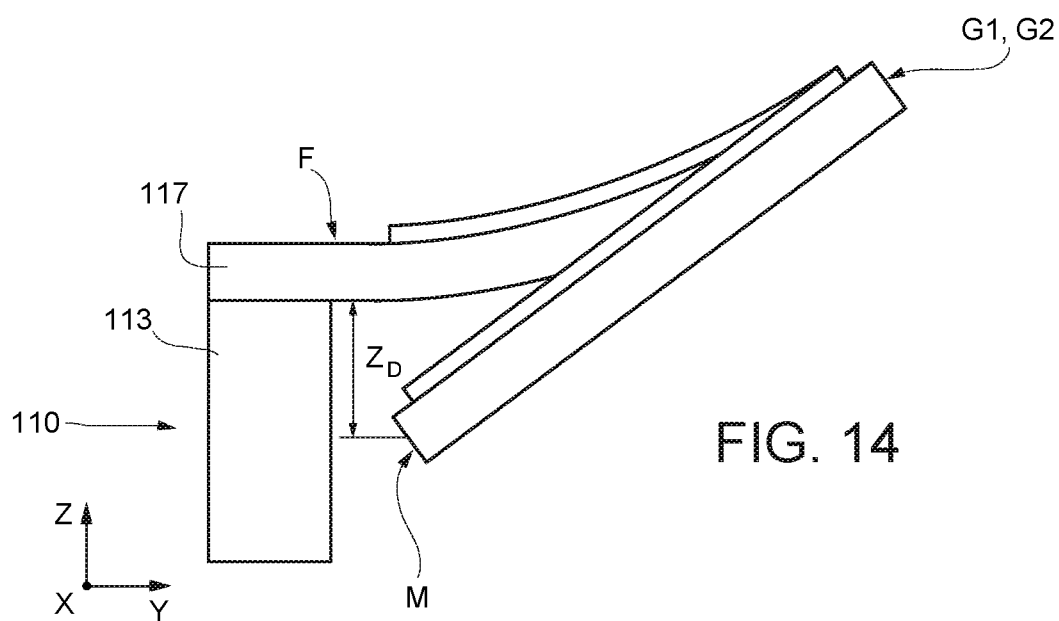
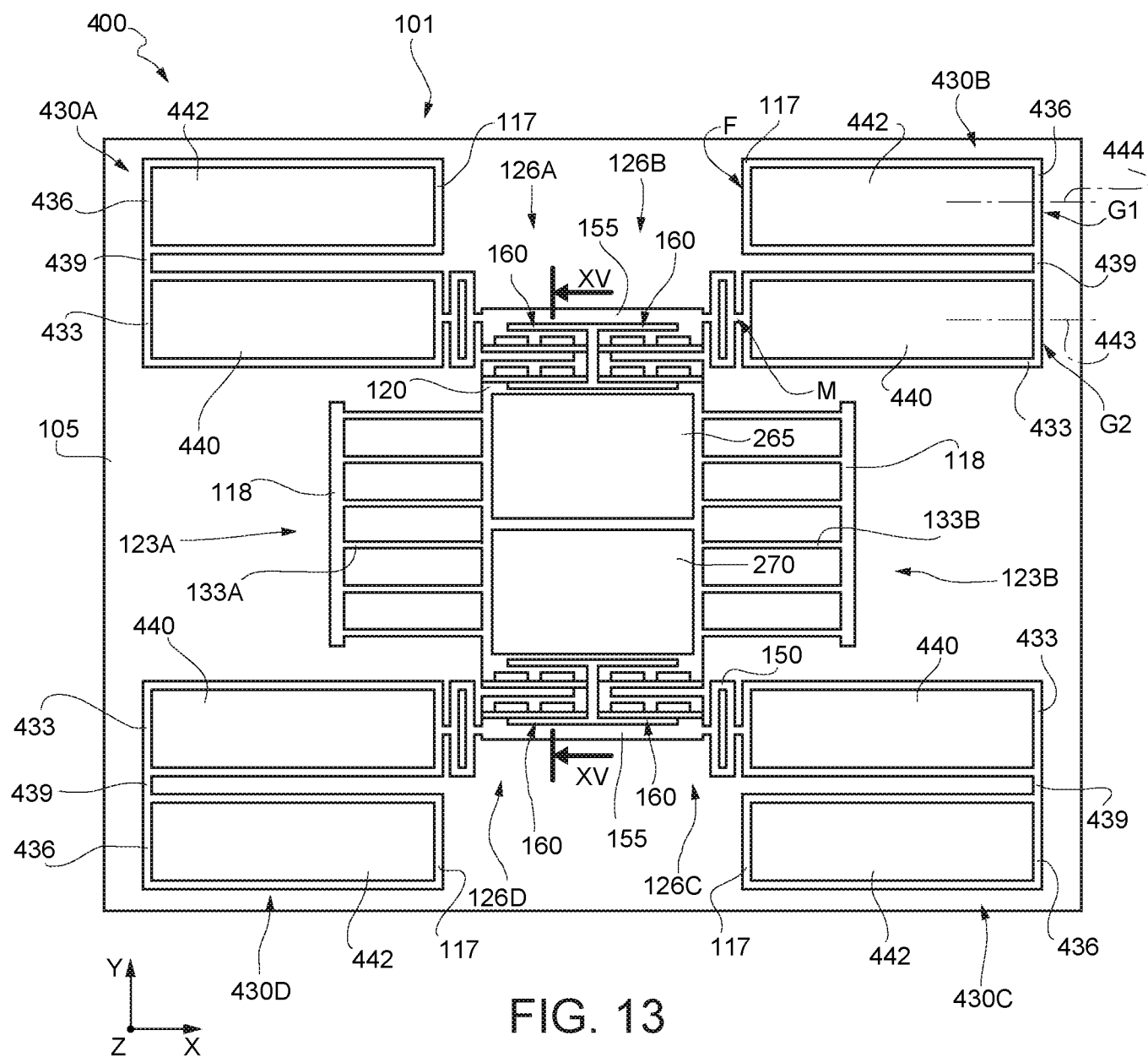


FIG. 10





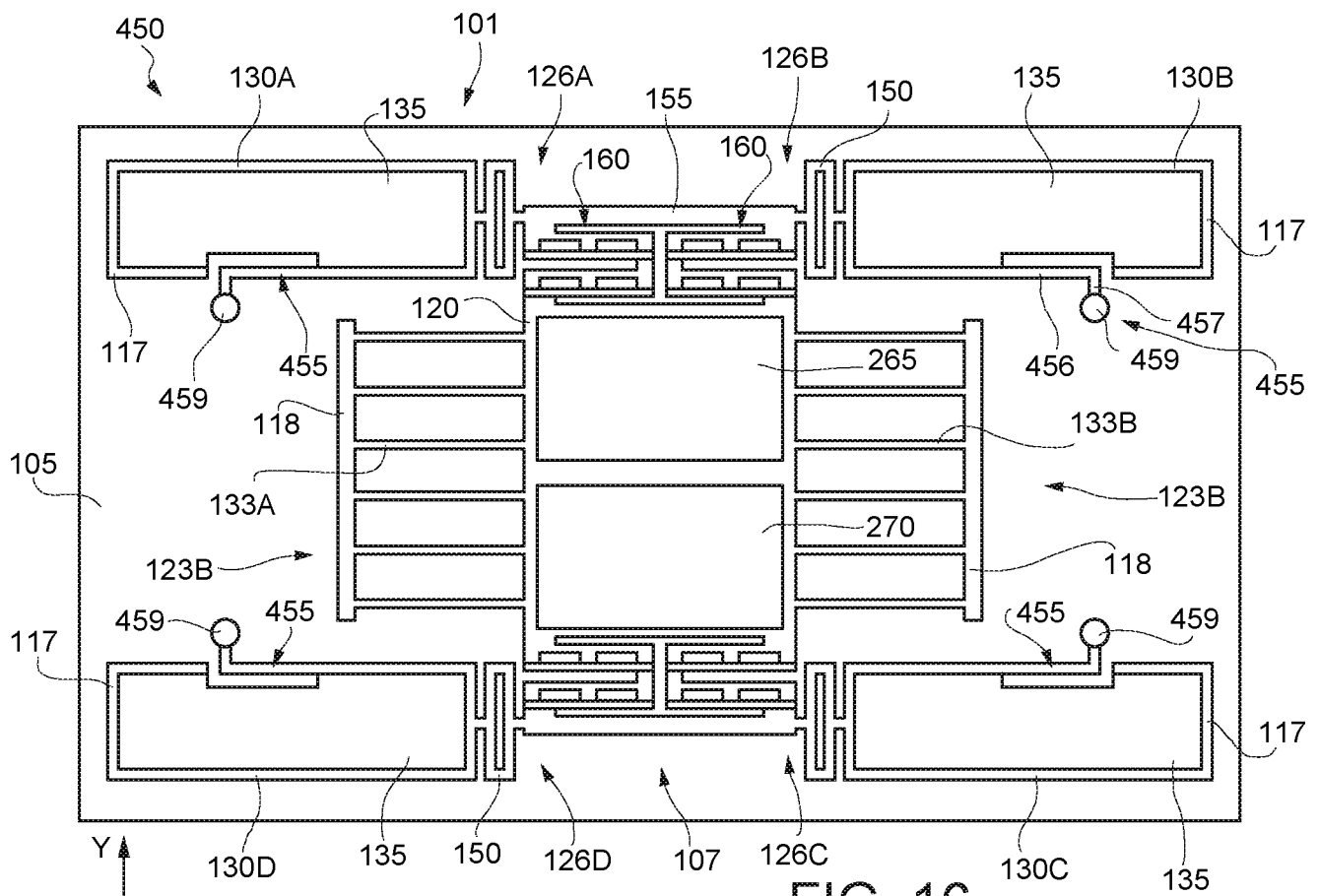


FIG. 16

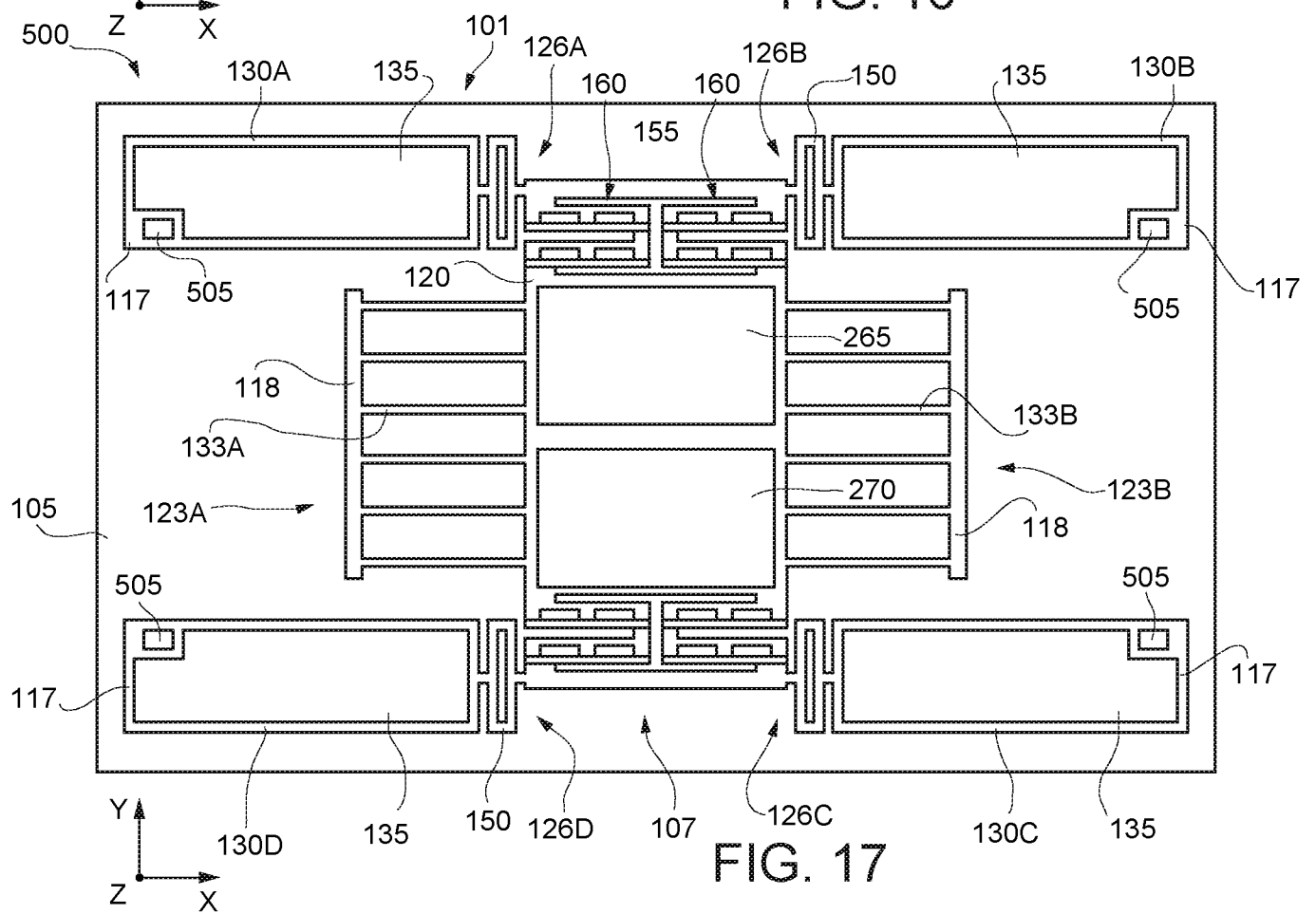


FIG. 17

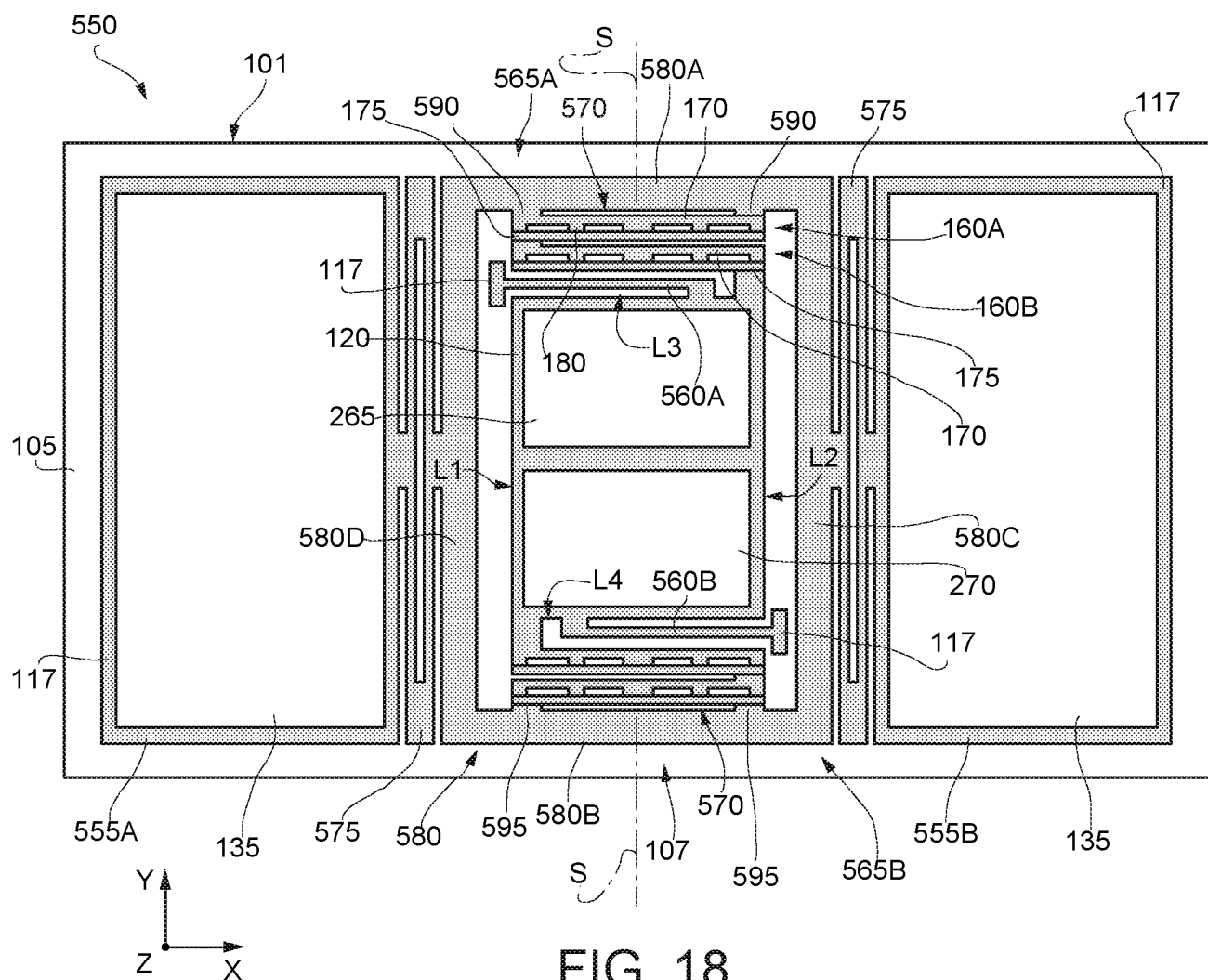


FIG. 18

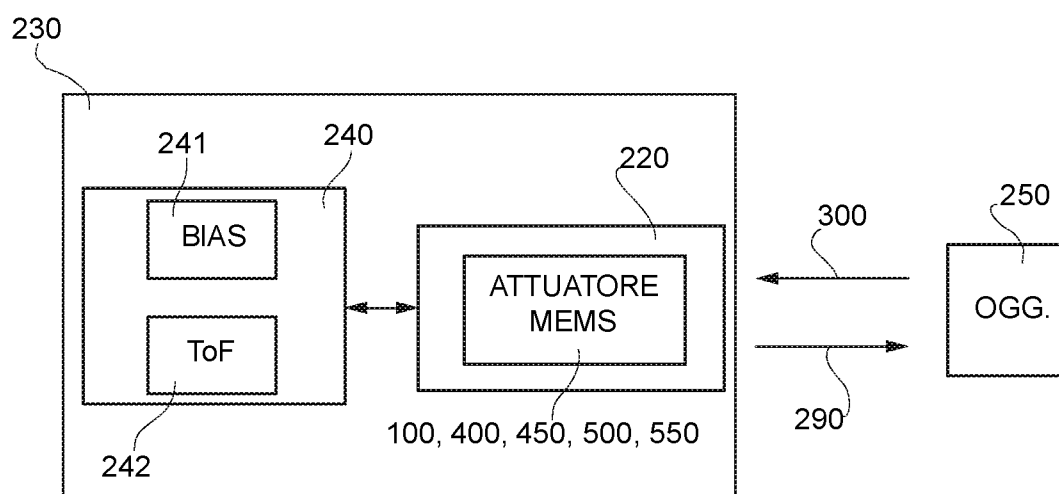


FIG. 19

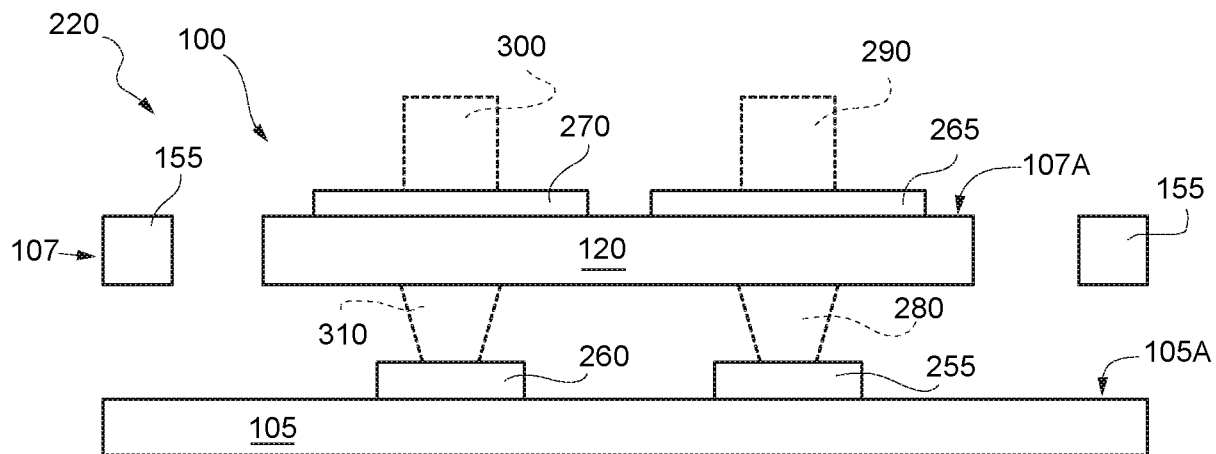


FIG. 20

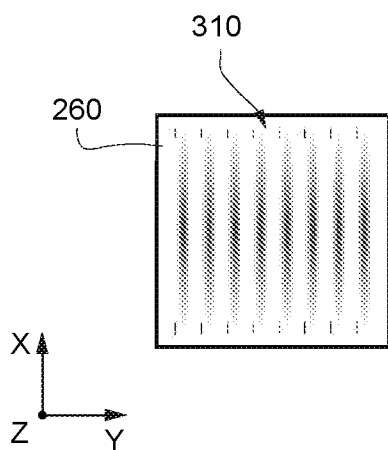
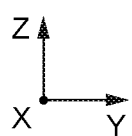


FIG. 22

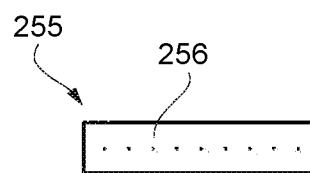


FIG. 21

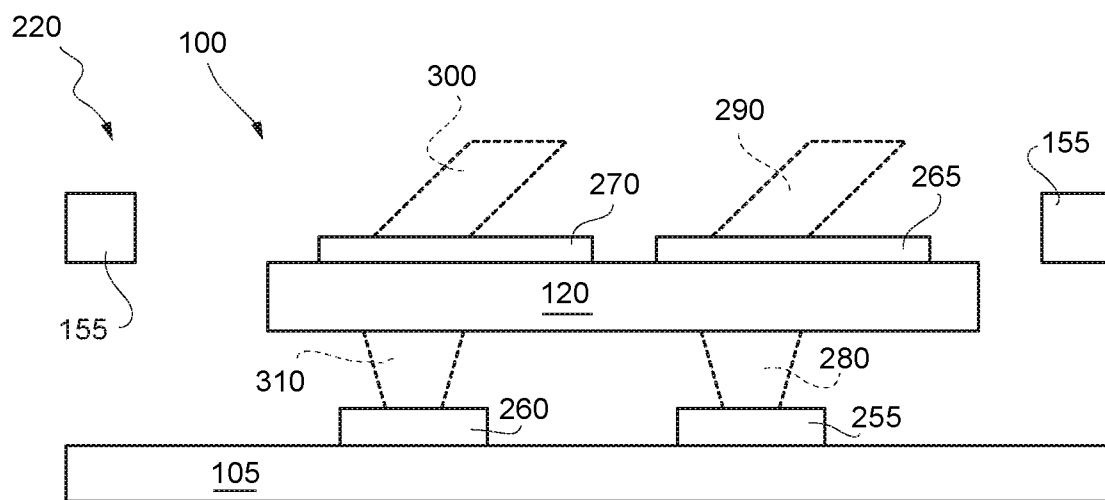
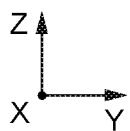
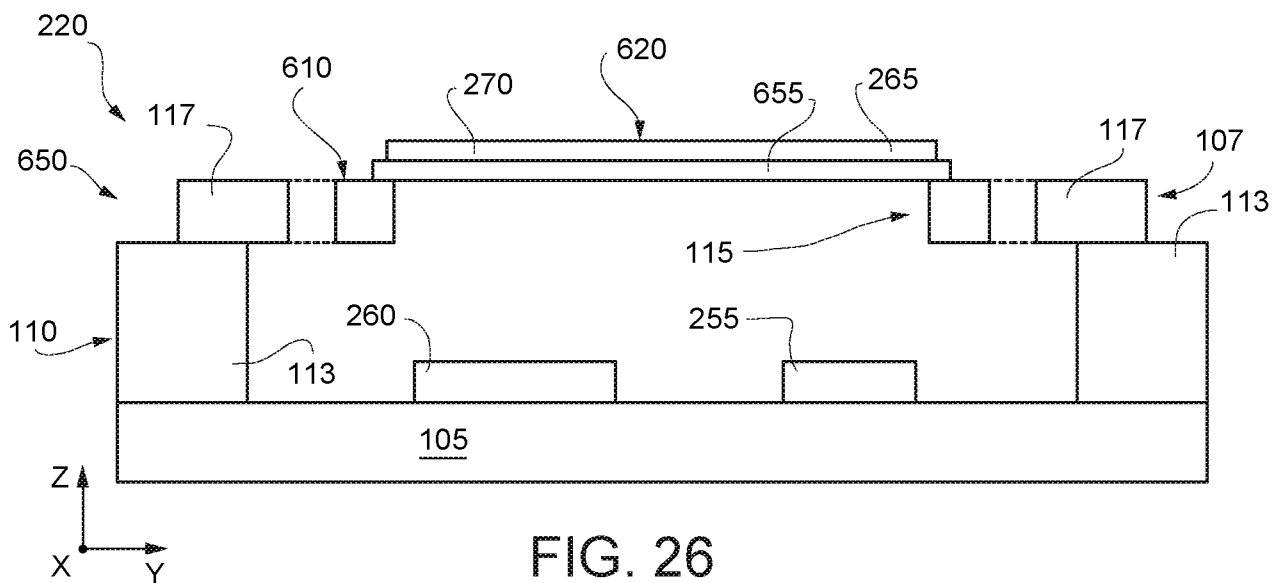
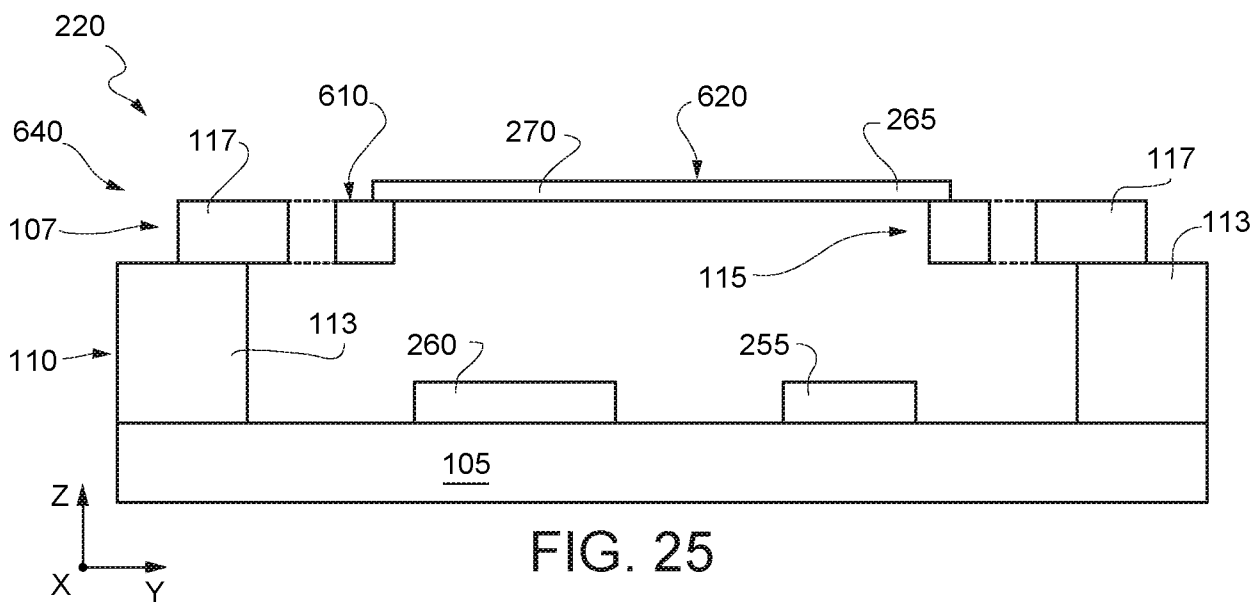
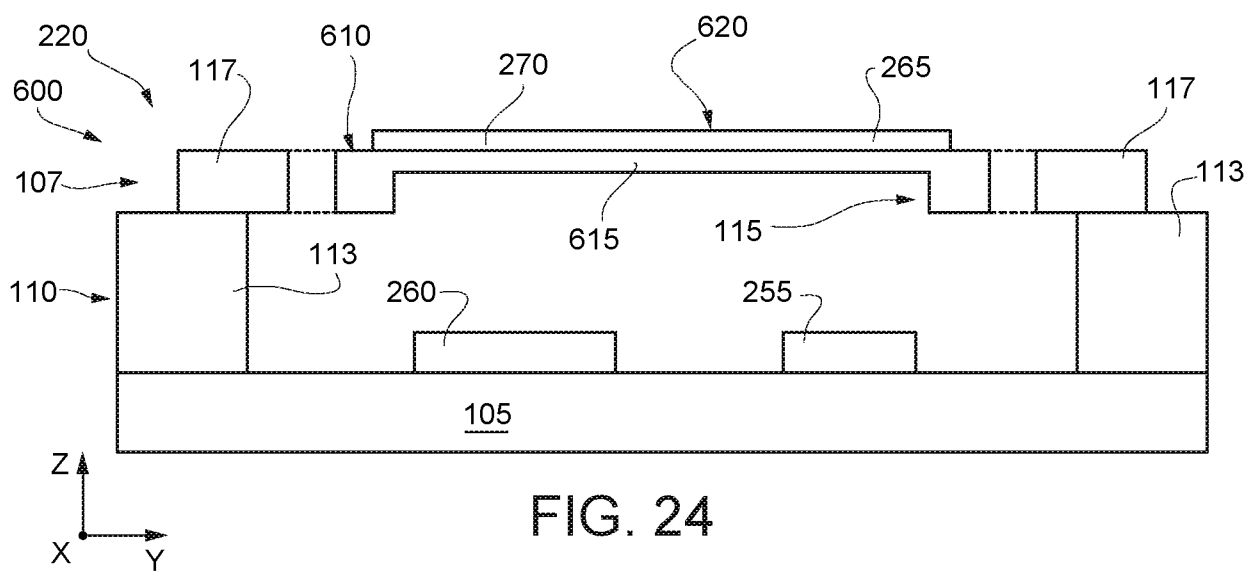
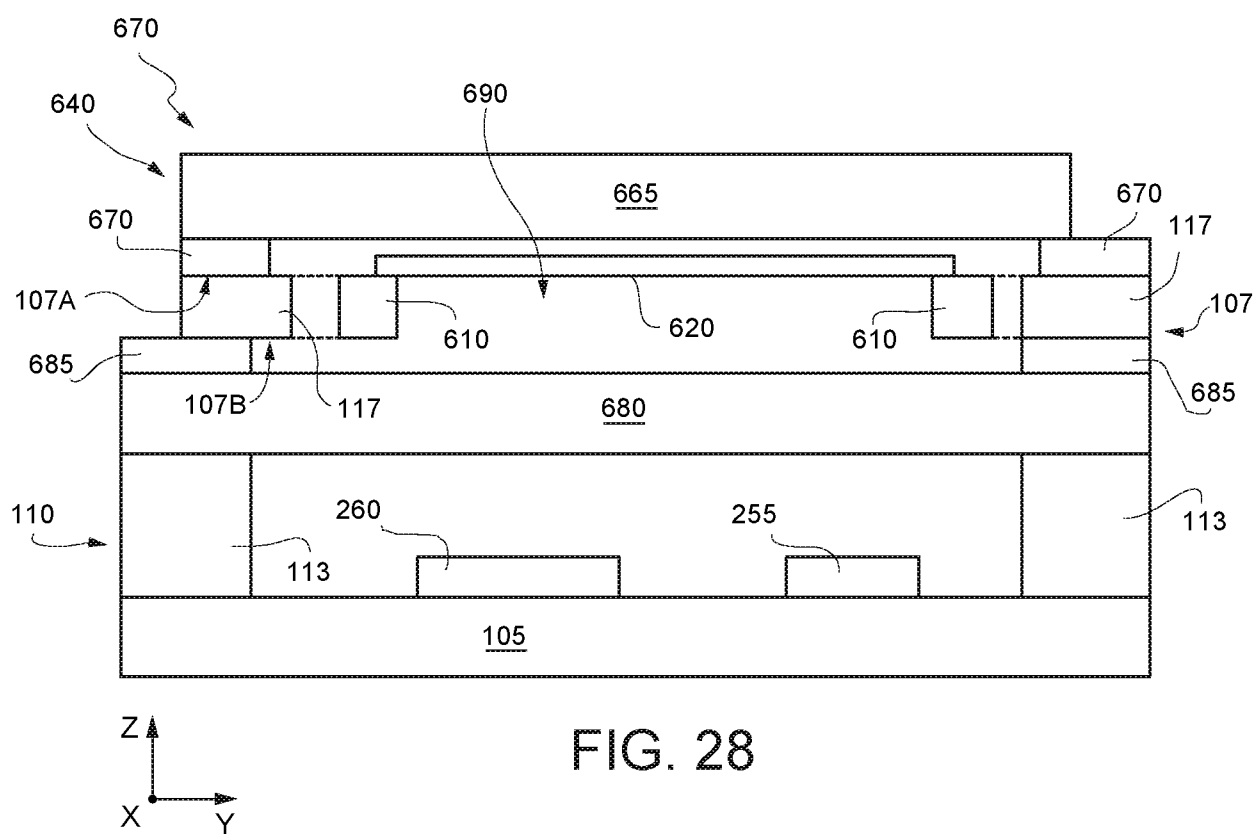
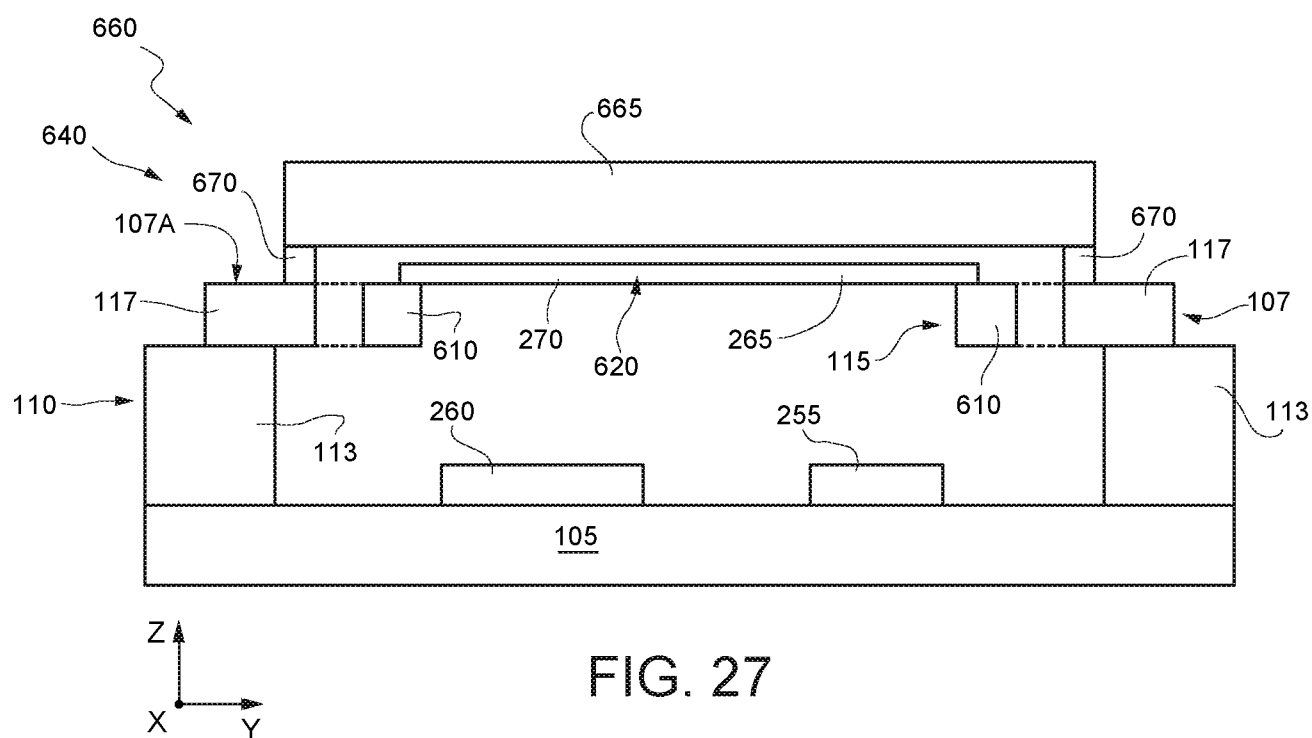


FIG. 23







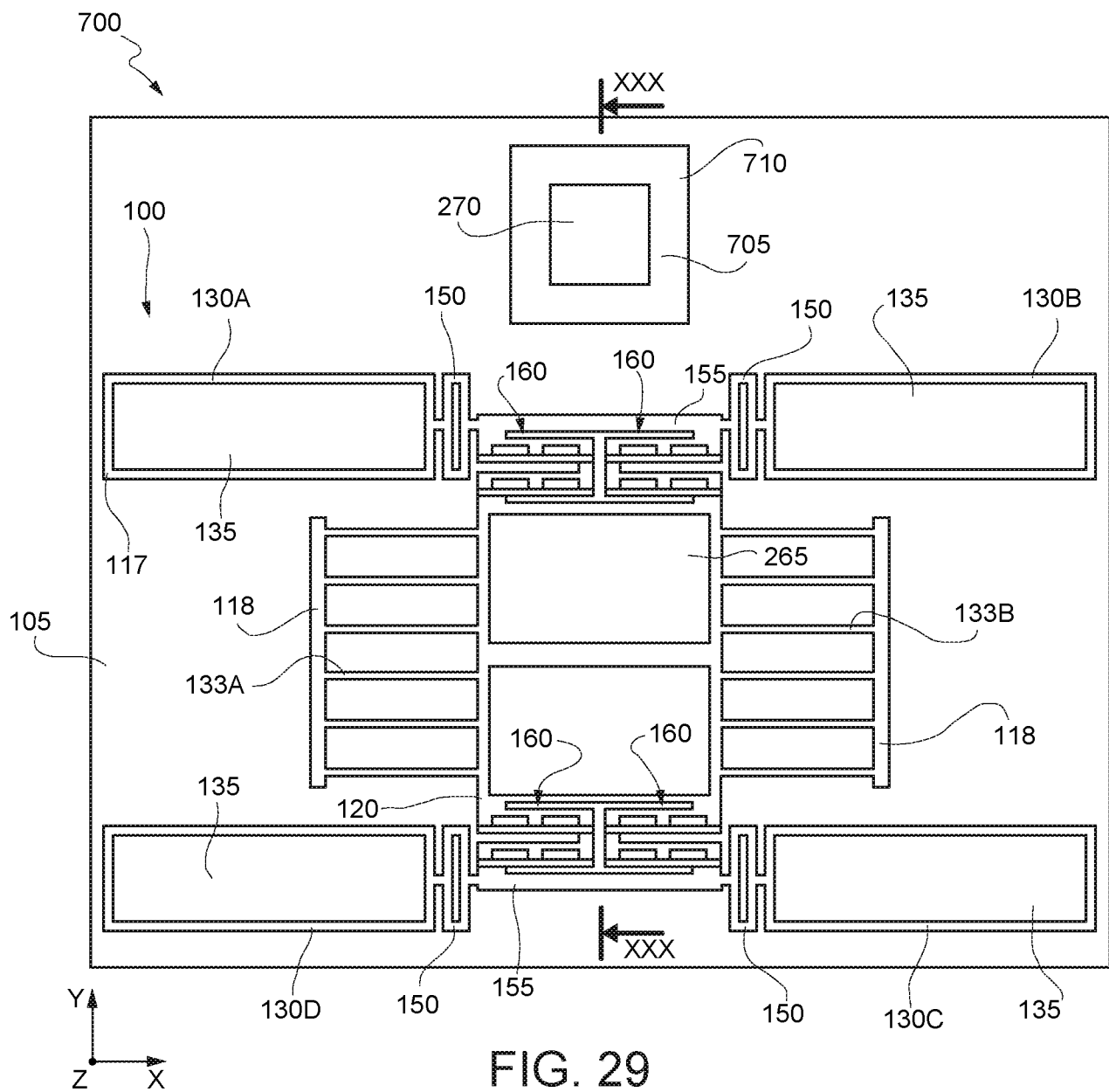


FIG. 29

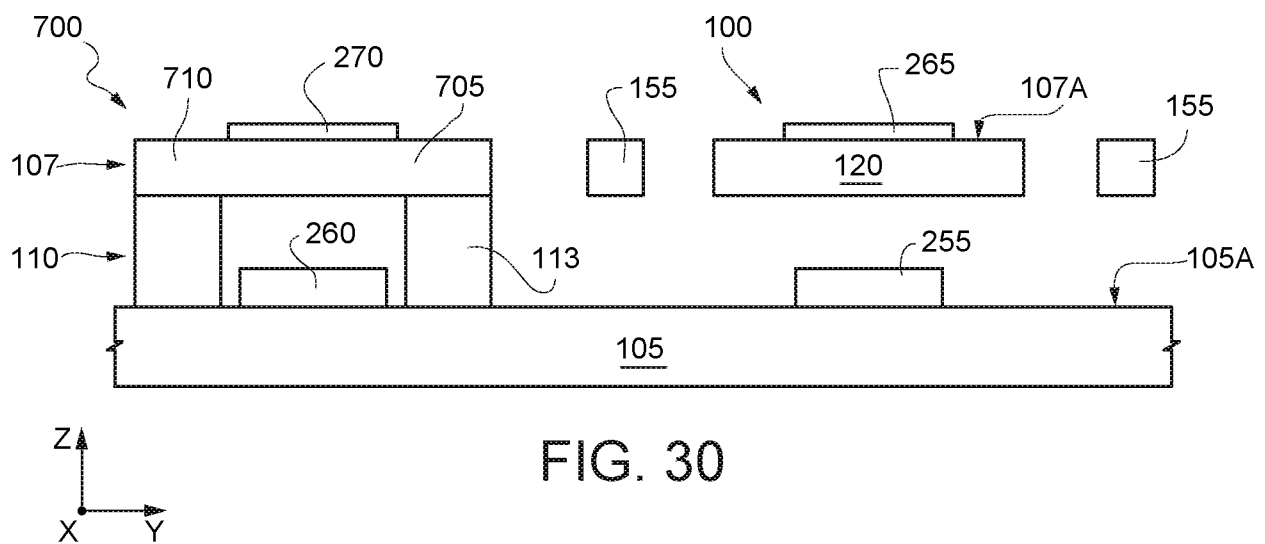


FIG. 30