

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102012902027187A1

Publication Date

20130828

Applicant

STMICROELECTRONICS S.R.L.

Title

SENSORE MICROELETTROMECCANICO CON RILEVAMENTO FUORI
PIANO E PROCEDIMENTO PER LA FABBRICAZIONE DI UN SENSORE
MICROELETTROMECCANICO

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"SENSORE MICROELETTROMECCANICO CON RILEVAMENTO FUORI PIANO
E PROCEDIMENTO PER LA FABBRICAZIONE DI UN SENSORE
MICROELETTROMECCANICO"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI, 2

AGRATE BRIANZA (MB)

Inventori: SIMONI Barbara, VALZASINA Carlo

*** ***** ***

La presente invenzione è relativa a un sensore microelettromeccanico con rilevamento fuori piano e a un procedimento per la fabbricazione di un sensore microelettromeccanico.

Come è noto, l'impiego di sistemi microelettromeccanici o MEMS (dall'inglese "Micro-Electro-Mechanical Systems") si è andato sempre più diffondendo in vari settori della tecnologia e ha dato risultati incoraggianti specialmente nella realizzazione di sensori inerziali, giroscopi microintegrati, e oscillatori elettromeccanici per svariate applicazioni.

I sistemi MEMS di questo tipo sono di solito basati su strutture microelettromeccaniche comprendenti almeno una massa collegata a un substrato fisso mediante molle e

mobile rispetto al substrato secondo prefissati gradi di libertà. La massa mobile e il substrato sono accoppiati capacitivamente mediante una pluralità di rispettivi elettrodi reciprocamente affacciati, in modo da formare dei condensatori. Il movimento della massa mobile rispetto allo statore, ad esempio a causa di una sollecitazione esterna, modifica la capacità dei condensatori; da qui si può risalire allo spostamento relativo della massa mobile rispetto al corpo fisso e quindi alla forza applicata.

In una prima famiglia di sensori microelettromeccanici (detti anche sensori con rilevamento in piano, "in-plane"), la massa mobile è vincolata in modo traslare o ruotare parallelamente al substrato. Più precisamente, in dispositivi di questo tipo la massa mobile può traslare lungo uno o due assi paralleli al substrato, oppure ruotare attorno a un asse ad esso perpendicolare. Gli elettrodi sono generalmente realizzati mediante definizione di strati conduttivi formati sopra al substrato ed eventualmente asportazione totale o parziale di strati sacrificali.

Una seconda famiglia di sensori microelettromeccanici (detti anche sensori con rilevamento fuori piano, "out-of-plane") comprende dispositivi in cui la massa mobile è vincolata in modo che la sua distanza dal substrato possa variare in risposta a sollecitazioni in accordo a un asse. In particolare, la massa mobile può traslare lungo un asse

perpendicolare al substrato oppure ruotare attorno a un asse parallelo al substrato. Gli elettrodi sono generalmente affacciati attraverso lo spazio che separa la massa mobile dal substrato, in modo da alternativamente avvicinarsi o allontanarsi secondo i movimenti della massa mobile. Per realizzare gli elettrodi, vengono depositi e sagomati strati conduttivi, i quali sono separati da uno strato dielettrico sacrificale. La massa mobile viene realizzata sullo strato conduttivo formato per ultimo. La rimozione dello strato sacrificale permette di liberare la massa mobile, creando un interstizio fra la massa mobile stessa e il substrato.

Esistono poi sensori microelettromeccanici in cui la massa mobile presenta più di un grado di libertà. In questo caso, il rilevamento può essere di tipo in piano lungo un primo asse e di tipo fuori piano lungo un secondo asse.

I sensori con rilevamento di tipo fuori piano presentano dei limiti per il fatto che le dimensioni dell'interstizio e le distanze fra gli elettrodi sono essenzialmente imposte dallo spessore dello strato sacrificale. A causa della struttura dei sensori di tipo fuori piano noti, c'è quindi scarsa libertà nella scelta della geometria degli elettrodi e delle dimensioni dell'interstizio. Poiché le prestazioni (in particolare sensibilità, accuratezza e valori di fondo scala) sono

influenzate in modo determinante da questi parametri, anche la varietà di sensori microelettromeccanici con rilevamento di tipo fuori piano è limitata.

Scopo della presente invenzione è fornire un sensore microelettromeccanico e un procedimento per la fabbricazione di un sensore microelettromeccanico che permettano di superare le limitazioni descritte.

Secondo la presente invenzione vengono realizzati un sensore microelettromeccanico e un procedimento per la fabbricazione di un sensore microelettromeccanico come definiti rispettivamente nelle rivendicazioni 1, e 14.

Per una migliore comprensione dell'invenzione, ne verranno ora descritte alcune forme di realizzazione, a puro titolo di esempio non limitativo e con riferimento ai disegni allegati, nei quali:

- la figura 1 è una vista in pianta dall'alto, semplificata e con parti asportate per chiarezza, di un sensore microelettromeccanico in accordo a una forma di realizzazione della presente invenzione;

- la figura 2 è una sezione trasversale attraverso il sensore di figura 1, presa lungo la linea II-II di figura 1;

- la figura 3 è una sezione trasversale attraverso il sensore di figura 1, presa lungo la linea III-III di figura 1;

- la figura 4 è una vista in pianta dall'alto del sensore di figura 1, presa lungo la linea IV-IV di figura 2;

- la figura 5 è una vista prospettica di tre quarti dall'alto di un particolare ingrandito del sensore di figura 1;

- la figura 6 è uno schema elettrico semplificato del sensore di figura 1;

- la figura 7 mostra la vista di figura 2, in una diversa configurazione operativa;

- la figura 8 è una sezione trasversale attraverso un sensore microelettromeccanico in accordo a una diversa forma di realizzazione della presente invenzione;

- le figure 9-12 sono sezioni trasversali di una fetta semiconduttrice in fasi di lavorazione successive di un procedimento per la fabbricazione di un sensore microelettromeccanico in accordo a una forma di realizzazione della presente invenzione;

- la figura 13 è una vista in pianta dall'alto, semplificata e con parti asportate per chiarezza, di un sensore microelettromeccanico in accordo a un'ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione;

- la figura 14 è una sezione trasversale attraverso il sensore di figura 13, presa lungo la linea XIV-XIV di figura 13;

- la figura 15 è una sezione trasversale attraverso il sensore di figura 13, presa lungo la linea XV-XV di figura 13; e

- la figura 16 è uno schema elettrico semplificato del sensore di figura 13.

Nelle figure 1-5, un sensore microelettromeccanico con rilevamento di tipo fuori piano in accordo a una forma di realizzazione della presente invenzione è illustrato in modo semplificato e indicato nel suo complesso con il numero di riferimento 1. Il sensore microelettromeccanico 1 comprende una struttura di supporto 2 e una massa di rilevamento 3, meccanicamente collegata alla struttura di supporto 2 in modo da avere uno o più gradi di libertà definiti (un grado di libertà rotatorio nella forma di realizzazione qui descritta).

La struttura di supporto 2 comprende un substrato 5, ad esempio di silicio o altro materiale semiconduttore monocristallino, e uno strato strutturale 6. Lo strato strutturale 6 è separato dal substrato 5 da uno strato dielettrico 7, nel quale sono annegate porzioni di linee di connessione elettrica 9, ad esempio in silicio policristallino.

Un cappuccio 10 è unito allo strato strutturale 6 mediante uno strato di incollaggio 11, che in una forma di realizzazione è in oro. In alternativa, lo strato di

incollaggio 11 potrebbe essere realizzato in altro materiale, quale, ad esempio, una pasta conduttiva. Inoltre, nel caso non sia necessaria un'interfaccia elettrica fra la struttura di supporto 2 e il cappuccio 10, la struttura di supporto 2 e il cappuccio 10 possono essere uniti mediante incollaggio diretto.

Il substrato 5, lo strato strutturale 6 e il cappuccio 10 definiscono una cavità 12, all'interno della quale sono alloggiate la massa di rilevamento 3 e un gruppo elettrodi fissi 13.

La massa di rilevamento 3 è realizzata in materiale semiconduttore, in particolare silicio policristallino, ed è collegata allo strato strutturale 6 mediante elementi elastici di sospensione 8 che, in una forma di realizzazione, permettono la rotazione della massa di rilevamento 3 attorno a un asse X non baricentrico, parallelo a una faccia 5a del substrato 5 delimitante la cavità 12. In assenza di sollecitazioni, la massa di rilevamento 3 è trattenuta in una posizione di equilibrio dagli elementi elastici di sospensione 8, mentre può oscillare in caso di rotazioni della struttura di supporto 2 attorno all'asse X oppure in caso di traslazione lungo un asse Z perpendicolare alla faccia 5a del substrato 5. La distanza fra la massa di rilevamento 3 e il substrato 2 varia quindi in risposta a sollecitazioni che causano

rotazioni della massa di rilevamento 3 attorno all'asse X (rotazioni della struttura di supporto 2 attorno all'asse X o accelerazioni lungo l'asse Z). Le oscillazioni della massa di rilevamento 3 sono limitate da un respingente 14, che può essere ad esempio di materiale dielettrico (ossido di silicio) e semiconduttore (polisilicio) o interamente dielettrico.

La massa di rilevamento 3 è inoltre provvista di un elettrodi mobili 15 in forma di lastre piane che si estendono a pettine parallelamente a un piano definito dall'asse Z e da un asse Y, perpendicolare agli assi X, Z e alla faccia 5a del substrato 5. Nella forma di realizzazione descritta, l'asse Y individua la dimensione prevalente degli elettrodi mobili 15.

Il gruppo elettrodi fissi 13 ha una porzione di ancoraggio (figure 1 e 4) collegata rigidamente al substrato 2 mediante ancoraggi 16 (figure 2 e 3), qui di materiale dielettrico, e comprende strutture di elettrodo 18, anch'esse in forma di lastre piane che si estendono a pettine dalla porzione di ancoraggio, parallelamente al piano definito dall'asse Z e dall'asse Y. Inoltre, gli elettrodi mobili 15 e le strutture di elettrodo 18 si estendono gli uni verso le altre e sono interdigitati, in modo che ciascun elettrodo mobile 15 ha una porzione disposta fra una rispettiva coppia di strutture di

elettrodo 18. In una forma di realizzazione, gli elettrodi mobili 15 e le strutture di elettrodo 18 hanno sostanzialmente la stessa dimensione in direzione dell'asse Z.

Ciascuna struttura di elettrodo 18 comprende un primo elettrodo fisso 18a e un secondo elettrodo fisso 18b, reciprocamente isolati da una regione dielettrica 19. In una forma di realizzazione, il primo elettrodo fisso 18a e il secondo elettrodo fisso 18b sono entrambi in silicio policristallino. Il primo elettrodo fisso 18a, la regione dielettrica 19 e il secondo elettrodo fisso 18b formano nell'ordine una pila in direzione parallela all'asse Z (e dunque perpendicolare alla faccia 5a del substrato 5). Il primo elettrodo fisso 18a occupa una porzione della struttura di elettrodo fisso 18 che si estende fra la regione dielettrica 19 e un margine 18c rivolto verso il substrato 5. Il secondo elettrodo fisso 18b occupa invece una porzione della struttura di elettrodo 18 che si estende fra la regione dielettrica 19 e un margine 18d opposto al margine 18c e rivolto verso il cappuccio 10.

Attraverso regioni conduttive 20a, 20b, ad esempio in polisilicio, il primo elettrodo fisso 18a e il secondo elettrodo fisso 18b sono collegati a rispettive linee di connessione elettrica 9, le quali sono a loro volta fissate al substrato 2 mediante gli ancoraggi 16.

Come mostrato in modo semplificato nelle figure 5 e 6, in ciascuna struttura di elettrodo 18 il primo elettrodo fisso 18a e il secondo elettrodo fisso 18b formano rispettivamente un primo condensatore 21a e un secondo condensatore 21b con corrispondenti elettrodi mobili 15. In questo modo, la massa di rilevamento 3 è accoppiata capacitivamente ai primi elettrodi fissi 18a e ai secondi elettrodi fissi 18b, rispettivamente con capacità complessive C_a , C_b (figura 6). I primi elettrodi fissi 18a e i secondi elettrodi fissi 18b sono collegati a rispettive piazzole di contatto 22a, 22b per fornire rispettivi segnali di rilevamento S_a , S_b a un dispositivo di controllo 23 (ASIC, Application Specific Integrated Circuit), dotato di un'unità di elaborazione 25. I segnali di rilevamento S_a , S_b sono indicativi della rispettive capacità complessive C_a , C_b del primo condensatore 21a e del secondo condensatore 21b.

Grazie alla conformazione delle strutture di elettrodo 18, l'unità di elaborazione 24 del dispositivo di controllo 23 può determinare l'ampiezza e il segno di una grandezza osservata Q (in questo caso l'accelerazione lungo l'asse Z o, in alternativa, l'accelerazione angolare attorno all'asse X) dalla differenza ΔS fra i segnali di rilevamento S_a , S_b . A riposo, infatti (figure 2 e 3), le capacità complessive C_a , C_b del primo condensatore 21a e

del secondo condensatore 21b sono massime, perché in ciascuna struttura di elettrodo 18 è massima l'area del primo elettrodo fisso 18a e del primo elettrodo fisso 18b affacciata all'elettrodo mobile 15. Quando la massa di rilevamento 3 ruota in un senso (in particolare in senso antiorario nell'esempio di figura 7, per effetto di un'accelerazione del sensore 1 in direzione parallela all'asse Z), la capacità complessiva C_a del primo condensatore 21a resta invariata, mentre la capacità complessiva C_b del secondo condensatore 21b diminuisce. A seguito della rotazione, infatti, l'intera porzione utile del primo elettrodo fisso 18a rimane affacciata al corrispondente elettrodo mobile 15; il secondo elettrodo fisso 18b è invece solo parzialmente affacciato al corrispondente elettrodo mobile 15, in misura determinata dall'entità della rotazione. Quando la rotazione ha verso opposto, la capacità complessiva C_b del secondo condensatore 21b resta invariata, mentre la capacità complessiva C_a del primo condensatore 21a diminuisce in ragione dell'entità della rotazione.

La conformazione delle strutture di elettrodo 18 permette quindi di determinare sia l'ampiezza, sia il segno della grandezza osservata Q della differenza ΔS fra i segnali di rilevamento S_a , S_b .

In una diversa forma di realizzazione (figura 8), gli

elementi elastici di sospensione 8 sono conformati in modo che la massa di rilevamento 3 trasli lungo un asse perpendicolare alla superficie 5a del substrato 5 (asse Z). In figura 8, la linea a tratto e punto rappresenta la massa di rilevamento 3 in una posizione diversa dalla posizione di riposo, ad esempio in risposta a un'accelerazione lineare del sensore 1 lungo una direzione opposta all'asse Z.

In una forma di realizzazione non illustrata, gli elementi elastici di sospensione 8 sono conformati in modo da consentire un ulteriore grado di libertà fra la massa di rilevamento 3 e la struttura di supporto 2. In particolare, la massa di rilevamento 3 può traslare lungo l'asse Y, oltre a ruotare attorno all'asse X (o traslare lungo l'asse Z) come descritto in precedenza. In questo caso, l'unità di elaborazione 25 del dispositivo di controllo 23 è configurata per determinare l'accelerazione lungo l'asse Z dalla differenza ΔS fra i segnali S_a , S_b , come già descritto, e, inoltre, è configurata per determinare l'accelerazione del sensore 1 lungo l'asse Y dalla somma dei segnali S_a , S_b . In pratica, la conformazione delle strutture di elettrodo 18 permette di utilizzare la massa di rilevamento 3 sia per il rilevamento fuori piano dell'accelerazione lungo l'asse Z, sia per il rilevamento nel piano dell'accelerazione lungo l'asse Y,

sostanzialmente come nei sensori di tipo interdigitato (comb-fingered).

Un procedimento per la fabbricazione del sensore 1 è illustrato nelle figure 9-12.

Inizialmente, sul substrato 5 vengono realizzati un primo strato dielettrico 30 e uno strato semiconduttore di silicio policristallino, che viene definito con un processo fotolitografico per realizzare le linee di connessione elettrica 9. Un secondo strato dielettrico 31 viene deposto e forma, con il primo strato dielettrico 30, uno strato sacrificale 7' che incorpora le linee di connessione elettrica 9. Successivamente, lo strato sacrificale 7' viene attaccato per scoprire porzioni delle linee di connessione elettrica 9 destinate ad ancorare le strutture di elettrodo 18. Uno strato di germe 33 di silicio policristallino viene deposto sulla superficie dello strato sacrificale 7'.

Quindi, figura 10, un primo strato pseudo-epitassiale 35 viene cresciuto a partire dallo strato di germe 33, con uno spessore controllato e pari all'altezza desiderata per i primi elettrodi fissi 18a (in alternativa, il primo strato pseudo-epitassiale 35 può essere cresciuto con uno spessore maggiore e successivamente planarizzato fino a ottenere lo spessore desiderato). Il primo strato pseudo-epitassiale 35 si estende in modo sostanzialmente continuo

e uniforme, e viene selettivamente rimosso mediante un attacco anisotropo (attacco trench) tra le porzioni di linee di connessione elettrica 9 non ricoperte dal secondo strato dielettrico 31. Successivamente, un terzo strato dielettrico 36 (illustrato a tratteggio in figura 10) viene formato sopra il primo strato pseudo-epitassiale 35 e riempie le interruzioni, in particolare fra le porzioni delle linee di connessione elettrica 9 non ricoperte dal secondo strato dielettrico 31. Il terzo strato dielettrico 36 viene poi sagomato e porzioni residue definiscono le regioni dielettriche 19.

Un secondo strato pseudo-epitassiale 38 (figura 11) viene cresciuto fino a uno spessore iniziale (indicato a tratteggio) dopo che è stato deposto un ulteriore strato di germe (non illustrato). Il secondo strato pseudo-epitassiale 38 viene poi planarizzato fino a quando la porzione sovrastante le regioni dielettriche 19 e destinata a definire i secondi elettrodi fissi 18b (figure 2 e 3) ha sostanzialmente lo stesso spessore del primo strato pseudo-epitassiale 35. Il primo strato pseudo-epitassiale 35 e il secondo strato pseudo-epitassiale 38 formano lo strato strutturale 6.

Mediante un attacco anisotropo perpendicolare alla faccia 5a del substrato 5 (attacco trench, figura 12), la massa di rilevamento 3 e il gruppo elettrodi 13 vengono

formati e separati dal resto dello strato strutturale 6. In particolare, fra la massa di rilevamento 3 e il gruppo elettrodi 13 viene realizzato un interstizio ("gap") 40 la cui configurazione determina le dimensioni degli elettrodi mobili 15 e delle strutture di elettrodo 18 e il loro accoppiamento capacitivo (in altre parole, le capacità C_a , C_b dei condensatori 21a, 21b).

In seguito, lo strato sacrificale 7' viene parzialmente rimosso mediante attacco isotropo controllato a tempo. In questo modo, il materiale dielettrico viene asportato solo in minima parte sotto le linee di connessione elettrica 9, che rimangono fissate al substrato 2. Porzioni residue dello strato sacrificale 7' formano lo strato dielettrico 7, gli ancoraggi 16 e parte dei respingenti 14.

La configurazione delle strutture di elettrodo 18, con i primi elettrodi fissi 18a e i secondi elettrodi fissi 18b sovrapposti e separati dalle regioni isolanti 19, è compatibile con l'utilizzo di un attacco trench per realizzare l'interstizio 40 che delimita la massa di rilevamento 3 e determina l'accoppiamento capacitivo con gli elettrodi fissi. È quindi possibile definire la forma e le dimensioni dell'interstizio 40 con grande libertà e, allo stesso tempo, ottenere una struttura compatta che consente una lettura differenziale delle capacità.

Le figure 13-16 mostrano un'ulteriore forma di realizzazione, secondo la quale un sensore microelettromeccanico 100 con rilevamento di tipo fuori piano comprende una struttura di supporto 102 e una massa di rilevamento 103, meccanicamente collegata alla struttura di supporto 102 in modo da avere due gradi di libertà definiti. Nella forma di realizzazione qui descritta, in particolare, la massa di rilevamento 103 ha un grado di libertà rotatorio e un grado di libertà traslatorio.

La struttura di supporto 102 comprende un substrato 105, ad esempio di silicio o altro materiale semiconduttore monocristallino, e uno strato strutturale 106. Lo strato strutturale 106 è separato dal substrato 105 da uno strato dielettrico 107, nel quale sono annegate porzioni di linee di connessione elettrica 109.

Un cappuccio 110 è unito allo strato strutturale 106 mediante uno strato di incollaggio 111.

Il substrato 105, lo strato strutturale 106 e il cappuccio 110 definiscono una cavità 112, all'interno della quale sono alloggiate la massa di rilevamento 103 e due gruppi elettrodi fissi 113, 114.

La massa di rilevamento 103 è realizzata in materiale semiconduttore, in particolare silicio policristallino, ed è collegata allo strato strutturale 106 mediante elementi elastici di sospensione 108, che sono conformati in modo da

consentire movimenti della massa mobile in accordo rispettivamente a un primo e a un secondo grado di libertà. In particolare, in una forma di realizzazione gli elementi elastici di sospensione 108 permettono la rotazione della massa di rilevamento 103 attorno a un asse X non baricentrico, parallelo a una faccia 105a del substrato 105 delimitante la cavità 112 e la traslazione lungo un secondo asse Y, anch'esso parallelo alla faccia 105a del substrato 105 e perpendicolare all'asse X. In alternativa, gli elementi elastici di sospensione 108 possono consentire la traslazione della massa di rilevamento 103 lungo un asse Z perpendicolare agli assi X, Y. In assenza di sollecitazioni, la massa di rilevamento 103 è trattenuta in una posizione di equilibrio dagli elementi elastici di sospensione 108, mentre può oscillare in caso di rotazioni della struttura di supporto 2 attorno all'asse X oppure in caso di traslazione lungo l'asse Y. Le oscillazioni della massa di rilevamento 103 in rotazione attorno all'asse X sono limitate da respingenti 116.

La massa di rilevamento 103 è inoltre provvista di due gruppi di elettrodi mobili 115a, 115b in forma di lastre piane che si estendono a pettine parallelamente a un piano definito dall'asse Z e da un asse Y e perpendicolare agli assi X, Z. Inoltre, i due gruppi di elettrodi mobili 115a, 115b sono sostanzialmente simmetrici e si estendono in

direzioni opposte rispetto all'asse X. Nella forma di realizzazione descritta, l'asse Y individua la dimensione prevalente degli elettrodi mobili 115a, 115b.

Il gruppo elettrodi fissi 113 è fissato rigidamente al substrato 102 mediante ancoraggi 117 di materiale dielettrico (figure 14 e 15) e comprende strutture di elettrodo 118 anch'esse in forma di lastre piane che si estendono a pettine verso la massa di rilevamento 103 parallelamente al piano definito dall'asse Z e dall'asse Y (si veda anche la figura 13). Gli elettrodi mobili 115a e le strutture di elettrodo 118 si estendono gli uni verso le altre e sono interdigitati, in modo che ciascun elettrodo mobile 115a ha una porzione disposta fra una rispettiva coppia di strutture di elettrodo 118.

Ciascuna struttura di elettrodo 118 comprende un rispettivo primo elettrodo fisso 118a e un rispettivo secondo elettrodo fisso 118b, entrambi in silicio policristallino e reciprocamente isolati da una regione dielettrica 119. Il primo elettrodo fisso 118a, la regione dielettrica 119 e il secondo elettrodo fisso 118b formano nell'ordine una pila in direzione parallela all'asse Z (e dunque perpendicolare alla faccia 105a del substrato 105). Il primo elettrodo fisso 118a occupa una porzione della struttura di elettrodo fisso 118 che si estende fra la regione dielettrica 119 e un margine 118c rivolto verso il

substrato 105. Il secondo elettrodo fisso 118b occupa invece una porzione della struttura di elettrodo 118 che si estende fra la regione dielettrica 119 e un margine 118d opposto al margine 118c e rivolto verso il cappuccio 110.

Il gruppo elettrodi fissi 114 è fissato rigidamente al substrato 102 mediante ancoraggi 121 di materiale dielettrico (figure 14 e 15), in posizione opposta al gruppo di elettrodi fissi 113 rispetto alla massa mobile 103. Il gruppo elettrodi fissi 114 comprende strutture di elettrodo 122 anch'esse in forma di lastre piane che si estendono a pettine verso la massa di rilevamento 103 parallelamente al piano definito dall'asse Z e dall'asse Y e perpendicolare alla faccia 105a del substrato 105 (si veda anche la figura 13). Gli elettrodi mobili 115b e le strutture di elettrodo 122 si estendono gli uni verso le altre e sono interdigitati, in modo che ciascun elettrodo mobile 115b ha una porzione disposta fra una rispettiva coppia di strutture di elettrodo 122.

Ciascuna struttura di elettrodo 122 comprende un rispettivo primo elettrodo fisso 122a e un rispettivo secondo elettrodo fisso 122b, entrambi in silicio policristallino e reciprocamente isolati da una regione dielettrica 123. Il primo elettrodo fisso 122a, la regione dielettrica 123 e il secondo elettrodo fisso 122b formano nell'ordine una pila in direzione parallela all'asse Z. Il

primo elettrodo fisso 122b (complanare al primo elettrodo fisso 118a di una corrispondente struttura di elettrodo 118) occupa una porzione della struttura di elettrodo fisso 122 che si estende fra la regione dielettrica 123 e un margine 122c rivolto verso il substrato 105. Il quarto elettrodo fisso 122b (complanare al secondo elettrodo fisso 118b di una corrispondente struttura di elettrodo 118) occupa invece una porzione della struttura di elettrodo 122 che si estende fra la regione dielettrica 123 e un margine 122d opposto al margine 122c e rivolto verso il cappuccio 110.

Il primi elettrodi fissi 118a, 122a delle strutture di elettrodo 118, 122 sono collegati a rispettive linee di connessione elettrica 109, le quali sono a loro volta fissate al substrato 102 mediante gli ancoraggi 117.

I secondi elettrodi fissi 118b, 122b delle strutture di elettrodo 118, 122 sono collegati a rispettive linee di connessione elettrica 129 realizzate nel cappuccio 110. La connessione è ottenuta su un lato 111a del cappuccio delimitante la cavità 112 mediante regioni di connessione 130 le quali sono definite da porzioni dello strato di incollaggio 111.

Come mostrato in modo semplificato in figura 16, i primi elettrodi fissi 118a e i secondi elettrodi fissi 118b delle strutture di elettrodo 118 sono capacitivamente

accoppiati a rispettivi elettrodi mobili 115a della massa di rilevamento 3 e definiscono con questi ultimi rispettivi condensatori che hanno capacità complessiva C_a , C_b . I terzi elettrodi fissi 122a e i quarti elettrodi fissi 122b delle strutture di elettrodo fisso 122 sono capacitivamente accoppiati a rispettivi elettrodi mobili 115b della massa di rilevamento 3 e definiscono con questi ultimi rispettivi condensatori che hanno capacità complessiva C_c , C_d . Inoltre, gli elettrodi fissi 118a, 118b, 122a, 122b sono collegati a rispettive piazzole di contatto 126a, 126b, 126c, 126d attraverso le linee di connessione elettrica 109, 129 per fornire rispettivi segnali di rilevamento S_a , S_b , S_c , S_d a un dispositivo di controllo 124 dotato di un'unità di elaborazione 125. I segnali di rilevamento S_a , S_b , S_c , S_d sono indicativi delle capacità complessive C_a , C_b , C_c , C_d dei rispettivi condensatori. Per semplicità, in figura 16 le piazzole di contatto 126a, 126b, 126c, 126d sono rappresentate come se fossero disposte tutte sulla struttura di supporto 2. In una forma di realizzazione, ad esempio, le piazzole 126c, 126d possono essere realizzate sul cappuccio 110 e collegate alle rispettive linee di connessione elettrica 129 attraverso prese ("plugs") 132, realizzate mediante tecnologia TSV (Through Silicon Vias).

L'unità di elaborazione 125 è configurata per determinare una prima grandezza osservata Q' (nella forma

di realizzazione descritta accelerazione lungo l'asse Z) e una seconda grandezza osservata Q'' (nella forma di realizzazione descritta accelerazione lungo l'asse Y) utilizzando i segnali di rilevamento S_a, S_b, S_c, S_d . Più precisamente, la prima grandezza osservata Q' viene determinata dall'unità di elaborazione 125 combinando i segnali S_a, S_b, S_c, S_d in un primo segnale risultante Sr' , che è indicativo della rotazione della massa di rilevamento 3 attorno all'asse X. Il primo segnale risultante Sr' , che viene utilizzato dall'unità di elaborazione 125 per determinare la prima grandezza osservata Q' , viene calcolato come segue:

$$Sr' = (S_a - S_b) - (S_c - S_d)$$

La seconda grandezza osservata Q'' viene invece determinata dall'unità di elaborazione 125 combinando i segnali S_a, S_b, S_c, S_d in un secondo segnale risultante Sr'' , che è indicativo della traslazione della massa di rilevamento 3 lungo l'asse Y. Il secondo segnale risultante Sr'' , che viene utilizzato dall'unità di elaborazione 125 per determinare la seconda grandezza osservata Q'' , viene calcolato come segue:

$$Sr'' = (S_a + S_b) - (S_c + S_d)$$

L'impiego di accoppiamenti capacitivi e la conformazione delle strutture di elettrodo 118, 122, insieme alla lettura di tipo differenziale descritta,

permettono di amplificare gli effetti degli spostamenti della massa di rilevamento 3 sulle capacità complessive Ca, Cb, Cc, Cd e di aumentare di conseguenza la sensibilità.

Al sensore e al procedimento descritti possono essere apportate modifiche e varianti, senza uscire dall'ambito della presente invenzione, come definita nelle rivendicazioni allegate.

RIVENDICAZIONI

1. Sensore microelettromeccanico comprendente:

una struttura di supporto (2; 102), avente un substrato (2; 102) e strutture di elettrodo (18; 118, 122) ancorate al substrato (5; 105); e

una massa di rilevamento (3; 103), mobile rispetto alla struttura di supporto (2; 102) in modo che una distanza fra la massa di rilevamento (3; 103) e il substrato (5; 105) sia variabile;

in cui la massa di rilevamento (3; 103) è provvista di elettrodi mobili (15; 115a, 115b) capacitivamente accoppiati alle strutture di elettrodo (18; 118, 122);

caratterizzato dal fatto che ciascuna struttura di elettrodo (18; 118, 122) comprende un primo elettrodo fisso (18a; 118a, 122a) e un secondo elettrodo fisso (18b; 118b, 122b) reciprocamente isolati da una regione dielettrica (19; 119, 123) e disposti in successione in una direzione sostanzialmente perpendicolare a una faccia (5a; 105a) del substrato (5; 105).

2. Sensore secondo la rivendicazione 1, in cui le strutture di elettrodo (18; 118, 122) e gli elettrodi mobili (15; 115a, 115b) son in forma di lastre piane reciprocamente affacciate e sostanzialmente perpendicolari alla faccia (5a; 105a) del substrato (5; 105).

3. Sensore secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui in

ciascuna struttura di elettrodo (18; 118) il primo elettrodo fisso (18a; 118a, 122a) occupa una porzione della struttura di elettrodo (18; 118, 122) che si estende fra la regione dielettrica (19; 119, 123) e un primo margine (18c; 118c, 122c) rivolto verso il substrato (5; 105) e il secondo elettrodo fisso (18b; 118b, 122b) occupa una porzione della struttura di elettrodo (18; 118) che si estende fra la regione dielettrica (19; 119) e un secondo margine (18d; 118d) opposto al primo margine (18c; 118c).

4. Sensore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui gli elettrodi mobili (15; 115a, 115b) e le strutture di elettrodo (18; 118, 122) sono interdigitati.

5. Sensore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui la massa di rilevamento (3; 103) è girevole attorno a un asse (X) parallelo alla faccia (5a; 105a) del substrato (5; 105) e perpendicolare agli elettrodi mobili (15; 115a, 115b) e alle strutture di elettrodo (18; 118; 122).

6. Sensore secondo la rivendicazione 5, in cui l'asse (X) è non baricentrico.

7. Sensore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 4, in cui la massa di rilevamento (3) è collegata alla struttura di supporto (2) in modo da traslare lungo un asse perpendicolare (Z) alla faccia (5a; 105a) del

substrato (5; 105).

8. Sensore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui gli elettrodi mobili (15; 115a, 115b) si estendono da un lato della massa di rilevamento (3; 103) verso le strutture di elettrodo (18; 118, 122).

9. Sensore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente un dispositivo di controllo (23) accoppiato alle strutture di elettrodo (18) per ricevere un primo segnale di rilevamento (Sa), indicativo di una prima capacità (Ca) fra gli elettrodi mobili (15) e i primi elettrodi fissi (18a), e un secondo segnale di rilevamento (Sb), indicativo di una seconda capacità (Cb) fra gli elettrodi mobili (15) e i secondi elettrodi fissi (18b);

in cui il dispositivo di controllo (23) è configurato per determinare un segnale risultante (Sr) dalla differenza fra il primo segnale di rilevamento (Sa) e il secondo segnale di rilevamento (Sb).

10. Sensore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 7, in cui:

gli elettrodi mobili (115a, 115b) comprendono primi elettrodi mobili (115a) e secondi elettrodi mobili (115b), estendentisi in direzioni opposte dalla massa di rilevamento (103);

le strutture di elettrodo (118, 122) comprendono prime strutture di elettrodo (118) e seconde strutture di

elettrodo (122) che si estendono verso rispettivamente i primi elettrodi mobili (115a) e i secondi elettrodi mobili (115b);

le prime strutture di elettrodo (118) sono affacciate a rispettivi primi elettrodi mobili (115a);

le seconde strutture di elettrodo (122) sono affacciate a rispettivi secondi elettrodi mobili (115b) e comprendono ciascuna un terzo elettrodo fisso (122a) e un quarto elettrodo fisso (122b) reciprocamente separati da un'ulteriore regione dielettrica (123) e disposti in successione in direzione sostanzialmente perpendicolare alla faccia (105a) del substrato (105).

11. Sensore secondo la rivendicazione 10, comprendente un dispositivo di controllo (124) accoppiato alle prime strutture di elettrodo (118) per ricevere un primo segnale di rilevamento (Sa), indicativo di una prima capacità (Ca) fra i primi elettrodi mobili (115a) e i primi elettrodi fissi (118a), e un secondo segnale di rilevamento (Sb), indicativo di una seconda capacità (Cb) fra i primi elettrodi mobili (115a) e i secondi elettrodi fissi (118b), e inoltre accoppiato alle seconde strutture di elettrodo (122) per ricevere un terzo segnale di rilevamento (Sc), indicativo di una terza capacità (Cc) fra i secondi elettrodi mobili (115b) e i terzi elettrodi fissi (118a), e un quarto segnale di rilevamento di rilevamento (Sd),

indicativo di una quarta capacità (Cd) fra i secondi elettrodi mobili (115b) e i quarti elettrodi fissi (118b);

in cui il dispositivo di controllo (23) è configurato per determinare, in una prima modalità operativa, un primo segnale risultante (Sr') dalla relazione:

$$Sr' = (Sa - Sb) - (Sc - Sd)$$

e, in una seconda modalità operativa, un secondo segnale risultante (Sr'') dalla relazione:

$$Sr'' = (Sa + Sb) - (Sc + Sd)$$

dove Sr' è il primo segnale risultante, Sr'' è il secondo segnale risultante e Sa, Sb, Sc, Sd sono rispettivamente il primo, il secondo, il terzo e il quarto segnale di rilevamento.

12. Sensore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente un cappuccio (110), unito alla struttura di supporto (102) in modo da formare una cavità (112) in cui è alloggiata la massa di rilevamento (103), e piazzole di contatto (126a, 126b, 126c, 126d) collegate alle strutture di elettrodo (118, 122) attraverso linee di connessione elettrica (109, 129);

in cui almeno alcune delle linee di connessione elettrica (129) sono incorporate nel cappuccio (110).

13. Sensore secondo la rivendicazione 12, in cui alcune delle linee di connessione elettrica (129) sono incorporate nella struttura di supporto (102) e sono

collegate ai primi elettrodi fissi (118a) e le linee di connessione elettrica (129) incorporate nel cappuccio (110) sono collegate ai secondi elettrodi fissi (118b).

14. Procedimento per la fabbricazione di un sensore microelettromeccanico, comprendente:

formare una struttura di supporto (2; 102), avente un substrato (2; 102) e strutture di elettrodo (18; 118, 122) ancorate al substrato (5; 105); e

formare una massa di rilevamento (3; 103), mobile rispetto alla struttura di supporto (2; 102) in modo che una distanza fra la massa di rilevamento (3; 103) e il substrato (5; 105) sia variabile;

in cui la massa di rilevamento (3; 103) è provvista di elettrodi mobili (15; 115a, 115b) capacitivamente accoppiati alle strutture di elettrodo (18; 118, 122);

caratterizzato dal fatto di comprendere:

formare un primo strato semiconduttore (35) sopra al substrato (5; 105);

formare regioni dielettriche (9; 119, 123), selettivamente in zone corrispondenti alle strutture di elettrodo (18; 118, 122);

formare un secondo strato semiconduttore (38) sopra al primo strato semiconduttore (35) e alle regioni dielettriche (9; 119, 123); e

formare un interstizio (40) nel primo strato

semiconduttore (35) e nel secondo strato semiconduttore (38), in modo da separare le strutture di elettrodo (18; 118, 122) dalla massa di rilevamento (3; 103) e definire, in ciascuna struttura di elettrodo (18; 118, 122), un primo elettrodo fisso (18a; 118a, 122a) e un secondo elettrodo fisso (18b; 118b, 122b) reciprocamente isolati da una rispettiva regione dielettrica (19; 119, 123).

15. Procedimento secondo la rivendicazione 14, in cui formare un interstizio (40) comprende attaccare il primo strato semiconduttore (35) e il secondo strato semiconduttore (38) in modo anisotropo, perpendicolarmente a una faccia (5a) del substrato (5).

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

Elena CERBARO

TITLE: MICROELECTROMECHANICAL SENSOR WITH OUT-OF-PLANE
SENSING AND PROCESS FOR MANUFACTURING A
MICROELECTROMECHANICAL SENSOR

CLAIMS

1. Microelectromechanical sensor comprising:

a supporting structure (2; 102), having a substrate (2; 102) and electrode structures (18; 118, 122) anchored to the substrate (5; 105); and

a sensing mass (3; 103), movable with respect to the supporting structure (2; 102) so that a distance between the sensing mass (3; 103) and the substrate (5; 105) is variable;

wherein the sensing mass (3; 103) is provided with movable electrodes (15; 115a, 115b) capacitively coupled to the electrode structures (18; 118, 122);

characterized in that each electrode structure (18; 118, 122) comprises a first fixed electrode (18a; 118a, 122a) and a second fixed electrode (18b; 118b, 122b) mutually insulated by a dielectric region (19; 119, 123) and arranged in succession in a direction substantially perpendicular to a face (5a; 105a) of the substrate (5; 105).

2. Sensor according to claim 1, wherein the electrode structures (18; 118, 122) and the movable electrodes (15; 115a, 115b) are in the form of flat plates facing one

another and substantially perpendicular to the face (5a; 105a) of the substrate (5; 105).

3. Sensor according to claim 1 or 2, wherein in each electrode structure (18; 118) the first fixed electrode (18a; 118a, 122a) occupies a portion of the electrode structure (18; 118, 122) that extends between the dielectric region (19; 119, 123) and a first margin (18c; 118c, 122c) facing the substrate (5; 105) and the second fixed electrode (18b; 118b, 122b) occupies a portion of the electrode structure (18; 118) that extends between the dielectric region (19; 119) and a second margin (18d; 118d) opposite to the first margin (18c; 118c).

4. Sensor according to any one of the foregoing claims, wherein the movable electrodes (15; 115a, 115b) and the electrode structures (18; 118, 122) are comb-fingered.

5. Sensor according to any one of the foregoing claims, wherein the sensing mass (3; 103) is rotatable about an axis (X) parallel to the face (5a; 105a) of the substrate (5; 105) and perpendicular to the movable electrodes (15; 115a, 115b) and to the electrode structures (18; 118; 122).

6. Sensor according to claim 5, wherein the axis(X) is a non-barycentric axis.

7. Sensor according to any one of claims 1 to 4, wherein the sensing mass (3) is connected to the supporting

structure (2) so as to translate along an axis perpendicular (Z) to the face (5a; 105a) of the substrate (5; 105).

8. Sensor according to any one of the foregoing claims, wherein the movable electrodes (15; 115a, 115b) project from a side of the sensing mass (3; 103) towards the electrode structures (18; 118, 122).

9. Sensor according to any one of the foregoing claims, comprising a control device (23) coupled to the electrode structures (18) for receiving a first sensing signal (Sa), indicative of a first capacitance (Ca) between the movable electrodes (15) and the first fixed electrodes (18a), and a second sensing signal (Sb), indicative of a second capacitance (Cb) between the movable electrodes (15) and the second fixed electrodes (18b);

wherein the control device (23) is configured to determine a resulting signal (Sr) from the difference between the first sensing signal (Sa) and the second sensing signal (Sb).

10. Sensor according to any one of claims 1 to 7, wherein:

the movable electrodes (115a, 115b) comprise first movable electrodes (115a) and second movable electrodes (115b), extending in opposite directions from the sensing mass (103);

the electrode structures (118, 122) comprise first electrode structures (118) and second electrode structures (122) that extend towards respectively the first movable electrodes (115a) and the second movable electrodes (115b);

the first electrode structures (118) face respective first movable electrodes (115a);

the second electrode structures (122) face respective second movable electrodes (115b) and comprise each a third fixed electrode (122a) and a fourth fixed electrode (122b) mutually separated by a further dielectric region (123) and arranged in succession in a direction substantially perpendicular to the face (105a) of the substrate (105).

11. Sensor according to claim 10, comprising a control device (124) coupled to the first electrode structures (118) for receiving a first sensing signal (Sa), indicative of a first capacitance (Ca) between the first movable electrodes (115a) and the first fixed electrodes (118a), and a second sensing signal (Sb), indicative of a second capacitance (Cb) between the first movable electrodes (115a) and the second fixed electrodes (118b), and furthermore coupled to the second electrode structures (122) for receiving a third sensing signal per (Sc), indicative of a third capacitance (Cc) between the second movable electrodes (115b) and the third fixed electrodes (118a), and a fourth sensing signal (Sd), indicative of a

fourth capacitance (Cd) between the second movable electrodes (115b) and the fourth fixed electrodes (118b);

wherein the control device (23) is configured to determine, in a first operation mode, a first resulting signal (Sr') from the relationship:

$$Sr' = (Sa - Sb) - (Sc - Sd)$$

and, in a second operation mode, a second resulting signal (Sr'') from the relationship:

$$Sr'' = (Sa + Sb) - (Sc + Sd)$$

where Sr' is the first resulting signal, Sr'' is the second resulting signal and Sa, Sb, Sc, Sd are respectively the first, the second, the third and the fourth sensing signal.

12. Sensor according to any one of the foregoing claims, comprising a cap (110), joined to the supporting structure (102) so as to form a cavity (112) in which the sensing mass (103) is accommodated, and contact pads (126a, 126b, 126c, 126d) connected to the electrode structures (118, 122) through electric connection lines (109, 129);

wherein at least some of the electric connection lines (129) are embedded in the cap (110).

13. Sensor according to claim 12, wherein some of the electric connection lines (129) are embedded in the supporting structure (102) and are connected to the first fixed electrodes (118a) and the electric connection lines (129) embedded in the cap (110) are connected to the second

fixed electrodes (118b).

14. Process for manufacturing a microelectromechanical sensor, comprising:

forming a supporting structure (2; 102), having a substrate (2; 102) and electrode structures (18; 118, 122) anchored to the substrate (5; 105); and

forming a sensing mass (3; 103), movable with respect to the supporting structure (2; 102) so that a distance between the sensing mass (3; 103) and the substrate (5; 105) is variable;

wherein the sensing mass (3; 103) is provided with movable electrodes (15; 115a, 115b) capacitively coupled to the electrode structures (18; 118, 122);

characterize by:

forming a first semiconductor layer (35) above the substrate (5; 105);

forming dielectric regions (9; 119, 123), selectively in areas corresponding to the electrode structures (18; 118, 122);

forming a second semiconductor layer (38) above the first semiconductor layer (35) and the dielectric regions (9; 119, 123); and

forming a gap (40) in the first semiconductor layer (35) and in the second semiconductor layer (38), so as to separate the electrode structures (18; 118, 122) from the

sensing mass (3; 103) and to define, in each electrode structure (18; 118, 122), a first fixed electrode (18a; 118a, 122a) and a second fixed electrode (18b; 118b, 122b) mutually insulated by a respective dielectric region (19; 119, 123).

15. Process according to claim 14, wherein forming a gap (40) comprises anisotropically etching the first semiconductor layer (35) and the second semiconductor layer (38), perpendicularly to a face (5a) of the substrate (5).

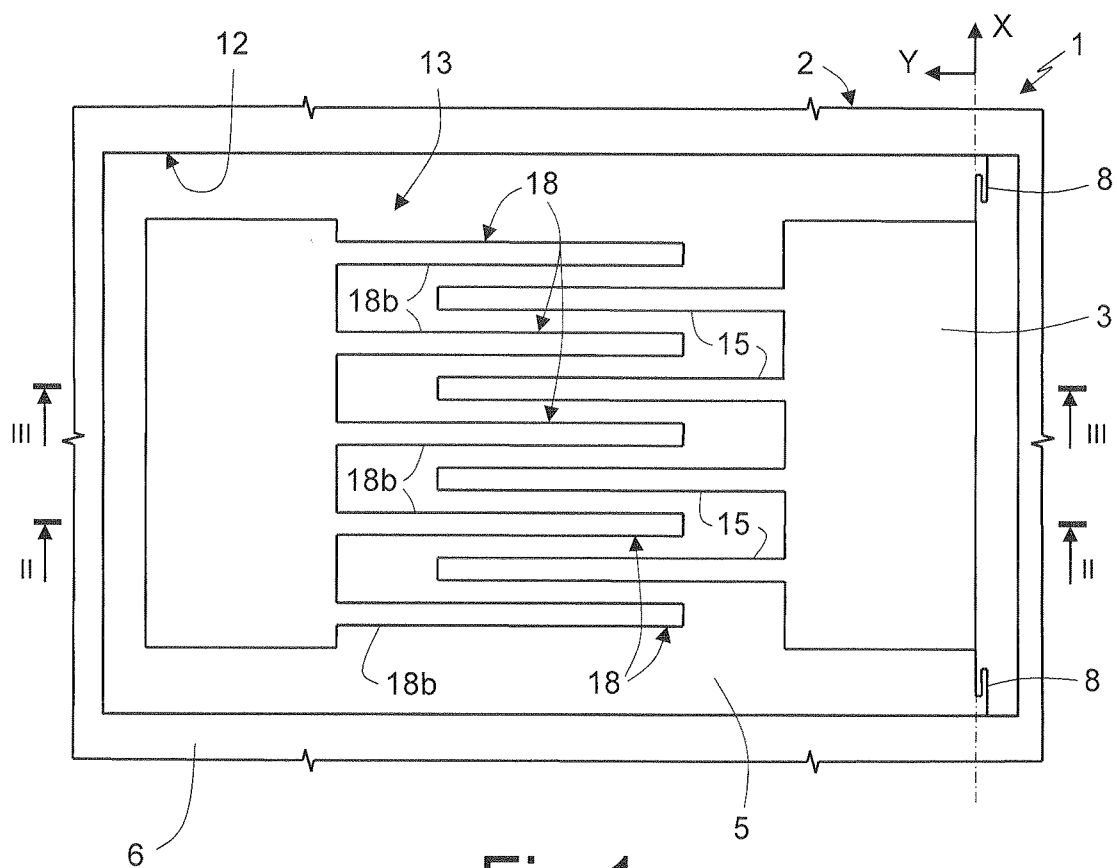


Fig.1

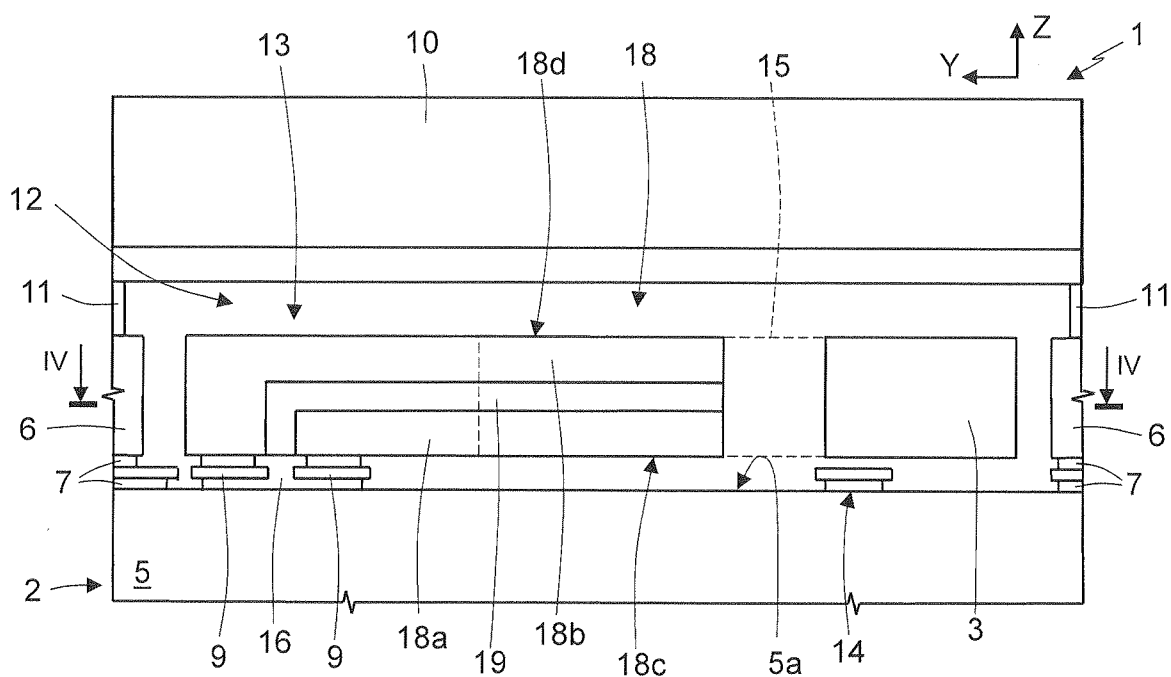


Fig.2

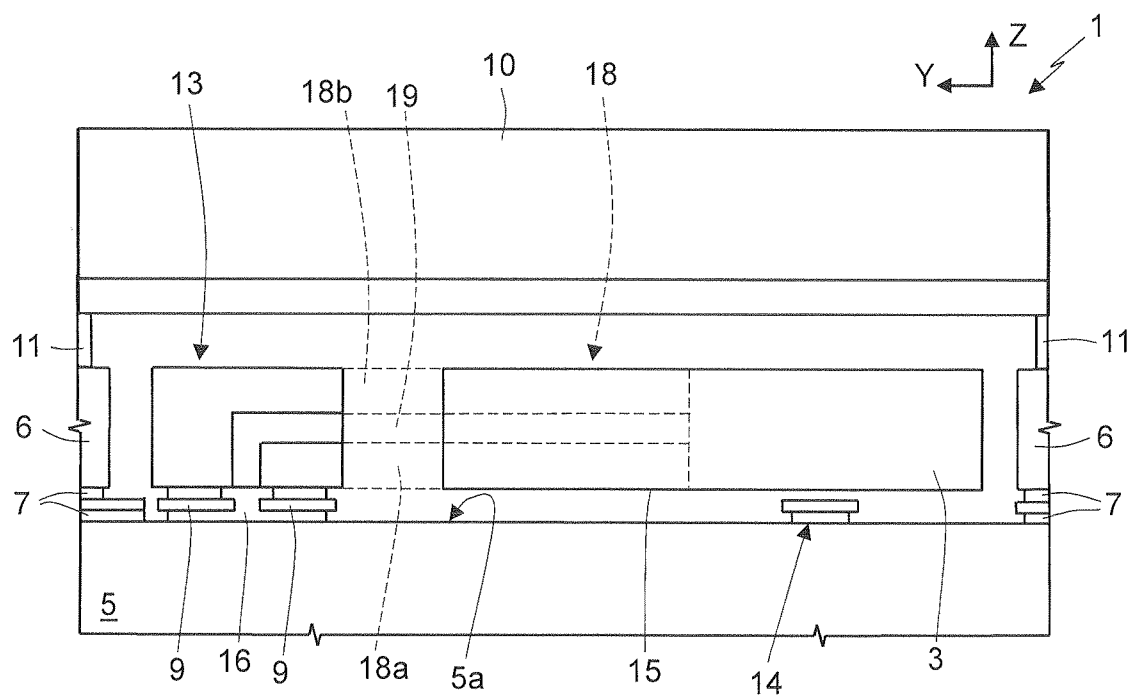


Fig.3

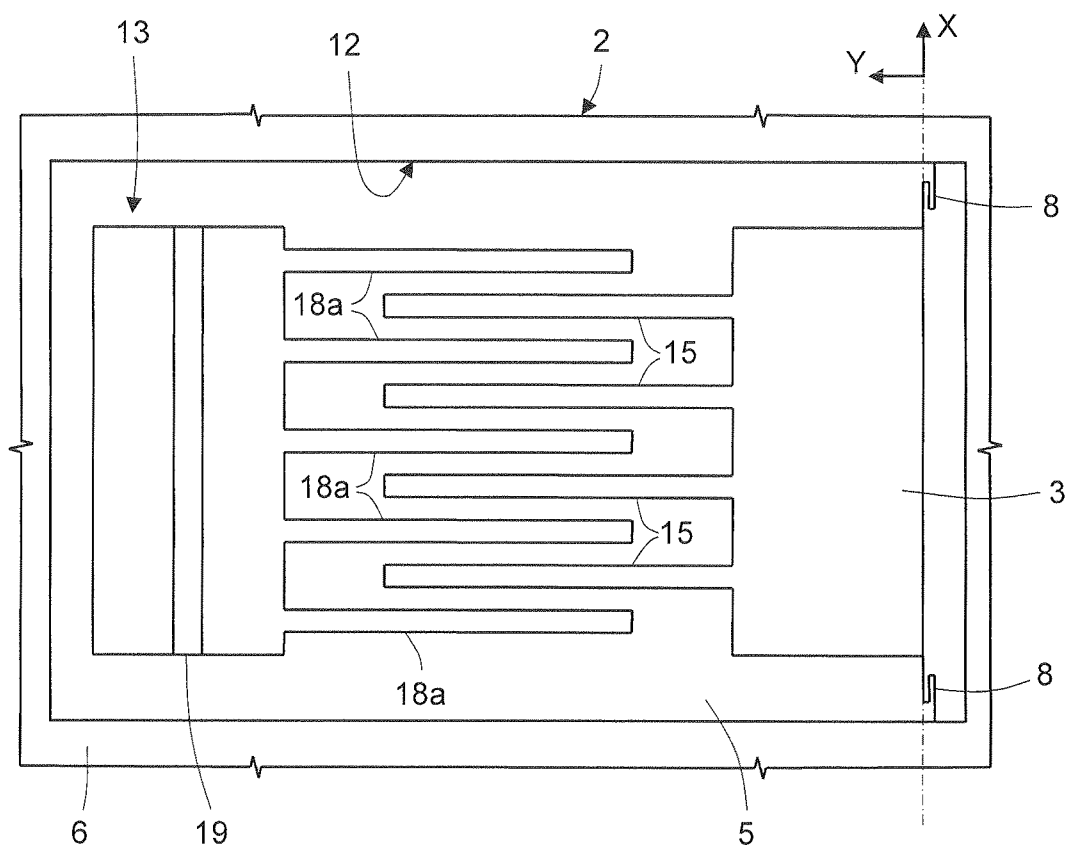


Fig.4

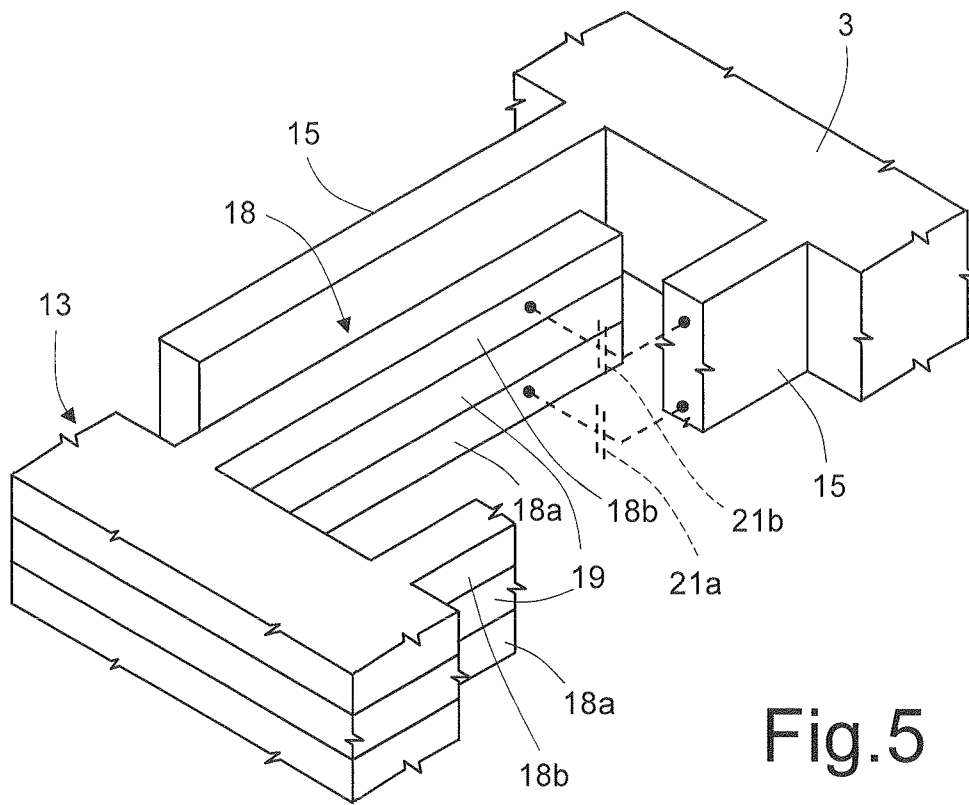


Fig.5

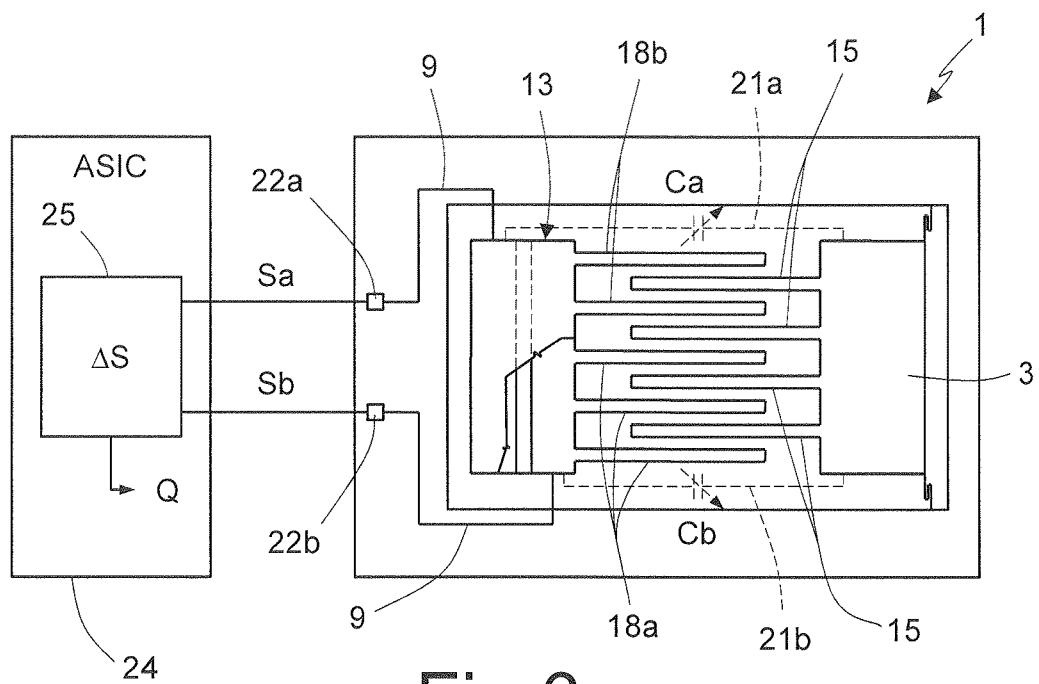


Fig.6

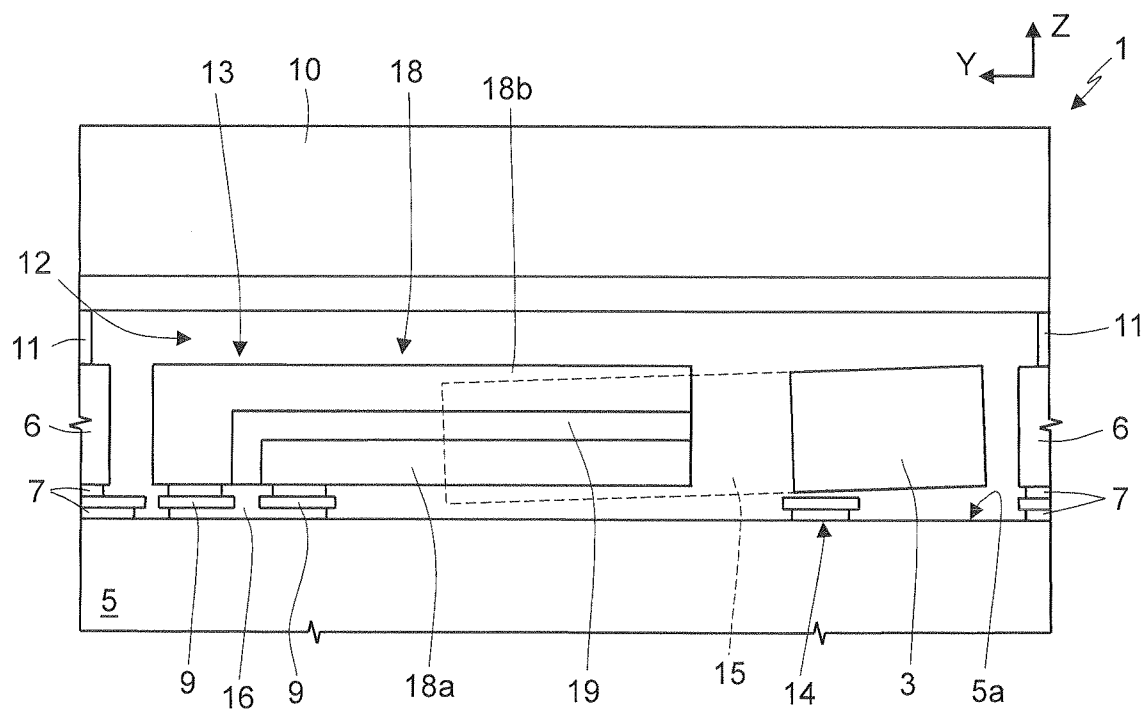


Fig.7

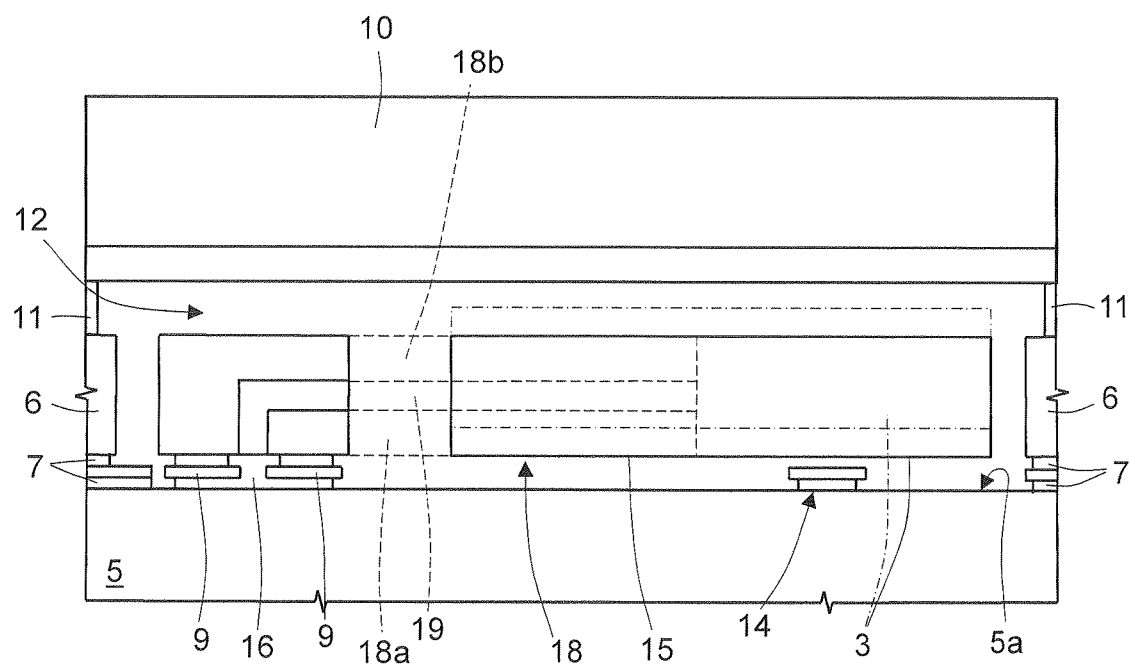


Fig.8

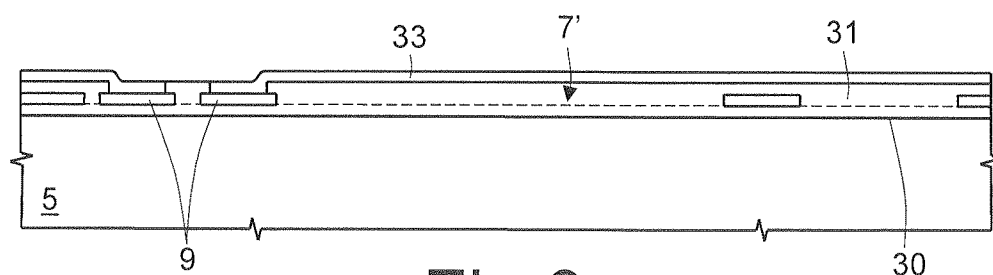


Fig.9

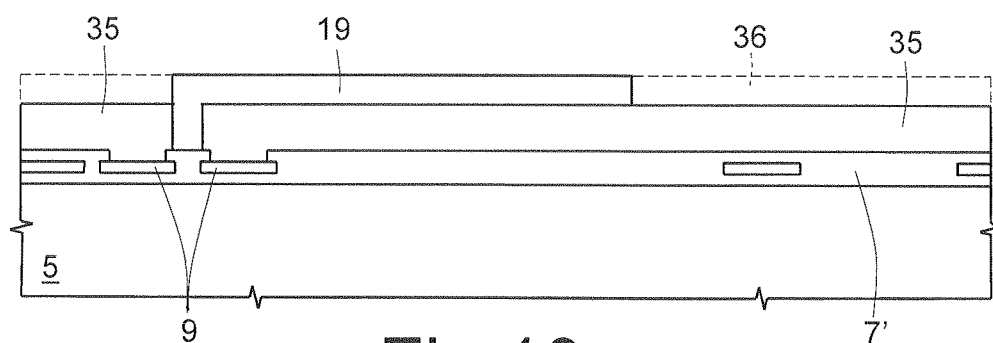


Fig.10

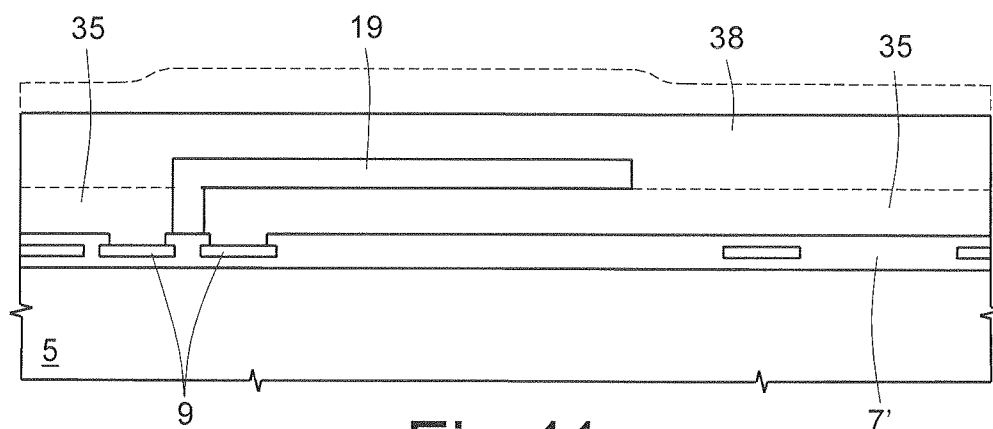


Fig.11

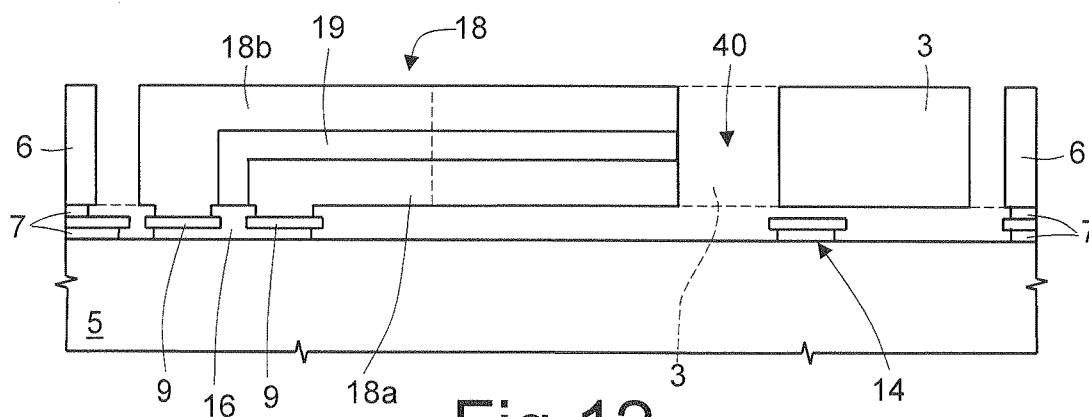


Fig.12

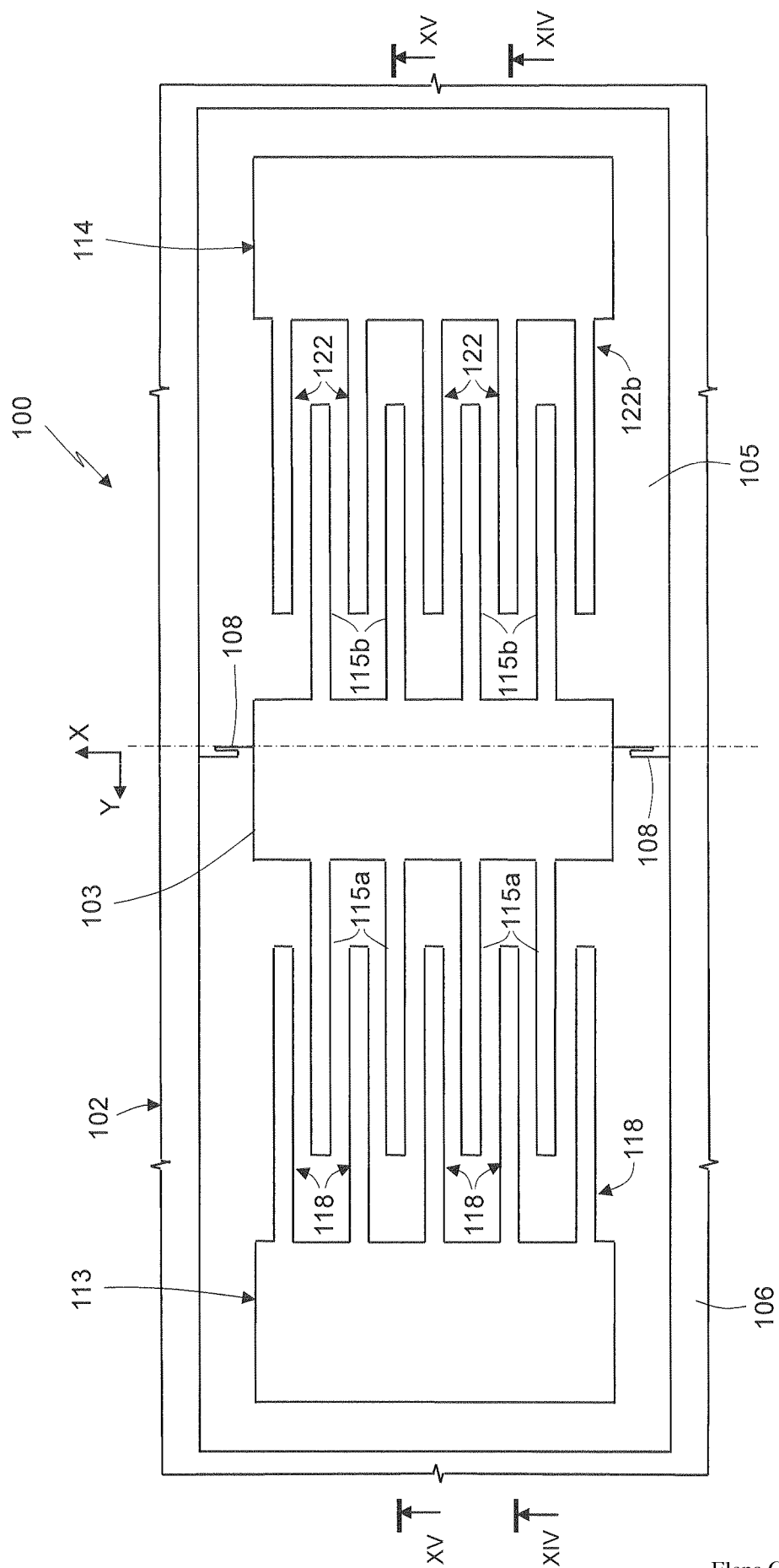


Fig.13

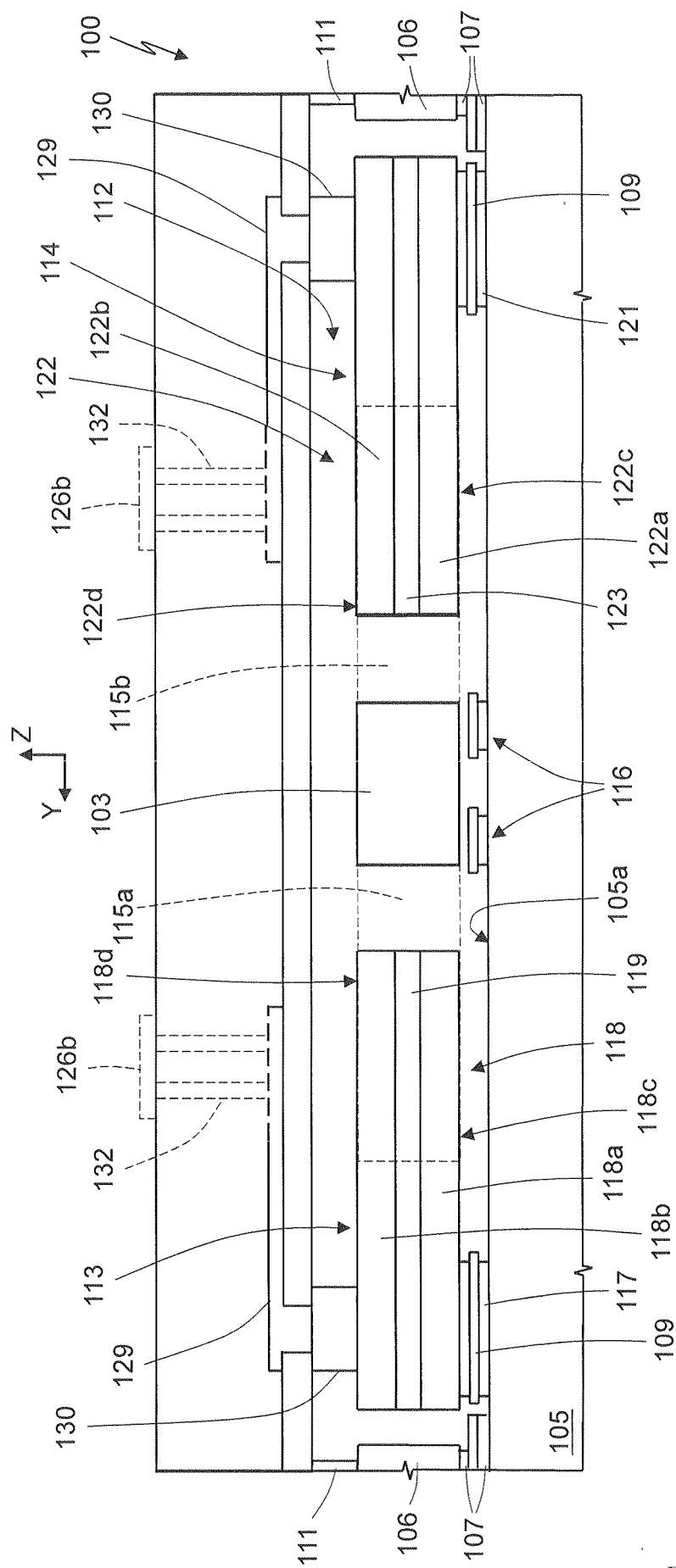


Fig. 14

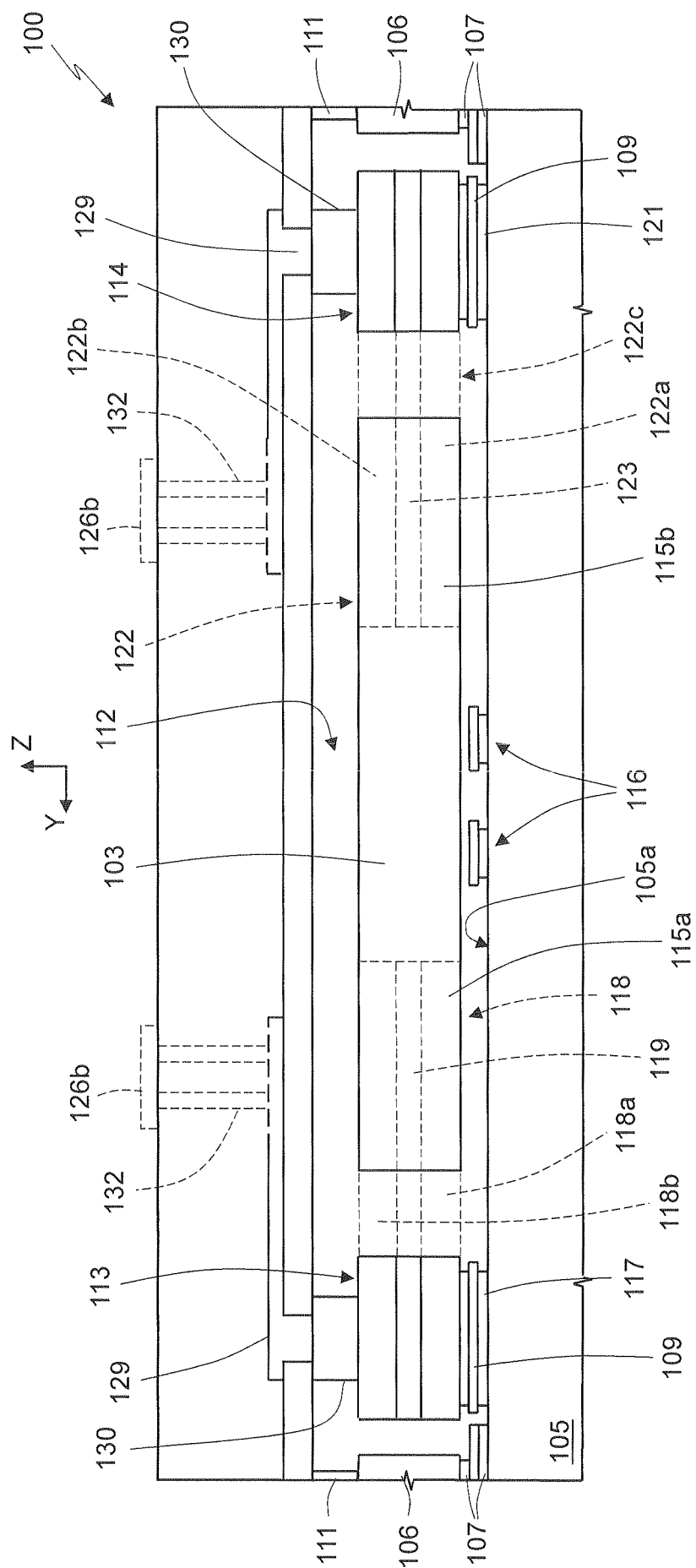


Fig.15

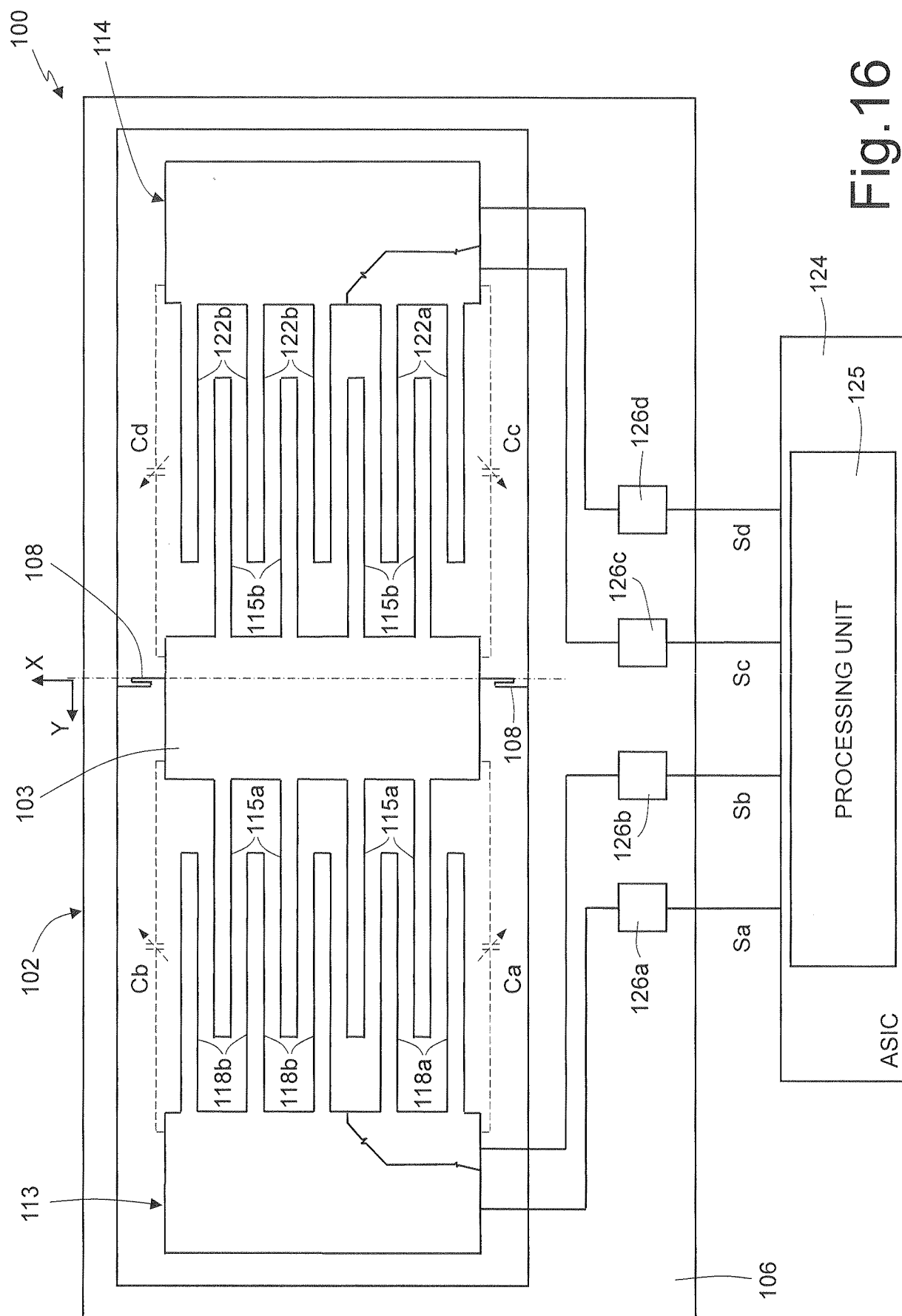


Fig.16