

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102020000010264
Data Deposito	07/05/2020
Data Pubblicazione	07/11/2021

Classifiche IPC

Titolo

ATTUATORE PIEZOELETTRICO AVENTE UN SENSORE DI DEFORMAZIONE E RELATIVO
PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"ATTUATORE PIEZOELETTRICO AVENTE UN SENSORE DI DEFORMAZIONE E
RELATIVO PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

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

Inventori: GIUSTI Domenico, PRELINI Carlo Luigi, FERRERA
Marco, LAZZARI Carla Maria

* * *

La presente invenzione è relativa ad un attuatore piezoelettrico avente un sensore di deformazione e al relativo procedimento di fabbricazione. In particolare, in seguito si farà riferimento ad un attuatore piezoelettrico realizzato in tecnologia MEMS ("Micro Electro-Mechanical System") a film piezoelettrico sottile.

Come noto, un attuatore MEMS è un dispositivo elettronico realizzato tipicamente a partire da una fetta di materiale semiconduttore, ad esempio silicio, in grado di provocare una deformazione di un elemento mobile quale una membrana o una trave a sbalzo ("cantilever").

Un attuatore MEMS può operare secondo diversi principi di attuazione, tra cui attuazione elettrostatica, elettromagnetica e piezoelettrica. In dettaglio, gli attuatori MEMS operanti secondo il principio di attuazione

piezoelettrica si distinguono per l'elevata efficienza energetica e l'elevata accuratezza di deformazione dell'elemento mobile; per questo motivo sono sempre più diffusi. In particolare, attuatori MEMS piezoelettrici con tecnologia a film piezoelettrico sottile sono attualmente utilizzati per ottenere valvole microfluidiche, dispositivi per la messa a fuoco di fotocamere e cartucce di stampa.

La figura 1 mostra una sezione trasversale di un attuttore MEMS piezoelettrico (in seguito anche indicato come attuttore 10) noto. L'attuttore 10 comprende una struttura di attuazione attiva 15 e una struttura deformabile 16 sospese sopra una cavità 12 realizzata in un corpo 11 di materiale semiconduttore, ad esempio silicio.

La struttura deformabile 16 è disposta al di sotto della struttura di attuazione attiva 15 ed è formata da una regione mobile 17 di materiale semiconduttore, ad esempio polisilicio, e una regione isolante 18, ad esempio di ossido di silicio. La regione isolante 18 è disposta sopra la regione mobile 17 in modo da isolarla elettricamente dalla struttura di attuazione attiva 15.

La struttura di attuazione attiva 15 è formata da una regione piezoelettrica 20, un elettrodo inferiore 21 e un elettrodo superiore 22.

L'elettrodo inferiore 21 è di materiale metallico, ad esempio platino, e si estende sulla struttura deformabile 16,

a contatto con la regione isolante 18.

La regione piezoelettrica 20 è formata da materiale piezoelettrico, ad esempio PZT (piombo-zirconato di titanio), BaTiO₃, KNN (niobato di sodio e potassio), PbTiO₂ o PbNb₂O₆.

Ad esempio, la regione piezoelettrica 20 ha uno spessore di alcuni micrometri, ad esempio compreso tra 1 µm e 3 µm, e si estende sopra l'elettrodo inferiore 21.

L'elettrodo superiore 22 è di materiale metallico, ad esempio una lega di titanio e tungsteno, e si estende sopra la regione piezoelettrica 20.

L'attuatore 10 comprende inoltre una regione di passivazione 25 e una regione di collegamento metallico 26.

La regione di passivazione 25 è qui formata da una pila di strati isolanti, ad esempio tre strati isolanti, includenti un primo strato isolante 25A, ad esempio di ossido di alluminio, disposto sopra la struttura di attuazione attiva 15 e la struttura deformabile 16, un secondo strato isolante 25B, ad esempio di vetro di silicio non drogato ("undoped silicon glass", USG) disposto sopra il primo strato isolante 25A, e un terzo strato isolante 25C, ad esempio di nitruro di silicio.

La regione di collegamento superiore 26 è formata da uno strato conduttivo, ad esempio di alluminio, AlCu, rame o oro, che si estende su almeno parte del secondo strato isolante 25B e forma una sporgenza attraversante il primo e il secondo

strato isolante 25A, 25B e in contatto elettrico diretto con l'elettrodo superiore 22. La regione di collegamento superiore 26 consente la connessione elettrica dell'elettrodo superiore 22 con piazzole di contatto, qui non mostrate, per la sua polarizzazione. Una regione di collegamento inferiore, non mostrata, analoga alla regione di collegamento superiore 26, consente la polarizzazione dell'elettrodo inferiore 21 ad un adatto potenziale, ad esempio a massa.

Il terzo strato isolante 25C si estende al di sopra del secondo strato isolante 25B e della regione di collegamento superiore 26.

La regione di passivazione 25 consente di isolare elettricamente e proteggere da agenti contaminanti esterni l'attuatore 10.

In uso, l'applicazione di una tensione di polarizzazione tra l'elettrodo inferiore 21 e l'elettrodo superiore 22 causa una deformazione della regione piezoelettrica 20 e conseguentemente della struttura deformabile 16, ad essa solidale.

In alcune applicazioni, è importante controllare l'entità della deformazione della struttura deformabile 16, in modo tale che essa sia conforme a quanto desiderato. A questo scopo, di frequente è previsto un sistema di controllo ad anello chiuso ("closed loop") che consente di controllare in tempo reale la deformazione della struttura deformabile 16.

A tale scopo, l'attuatore 10 può essere dotato di sensori di deformazione della struttura deformabile 16, ad esempio realizzati attraverso strutture piezoelettriche formate dallo stesso strato che costituisce la regione piezoelettrica 20 o attraverso strutture piezoresistive. Tuttavia, tali soluzioni non sono ottimali.

Infatti, il PZT è un materiale ferroelettrico caratterizzato da isteresi e da una elevata permittività elettrica relativa. Di conseguenza, esso genera basse tensioni di rilevamento in seguito a stress meccanici, rendendo la misura di stress rumorosa e non accurata.

I piezoresistori sono dispositivi che, in presenza di stress meccanici, subiscono una variazione di resistenza elettrica e permettono quindi di rilevare la deformazione della struttura deformabile mediante una rilevazione di tensione o corrente. Tuttavia, tale rilevazione è di tipo attivo e quindi implica un passaggio di corrente con conseguente consumo energetico elevato.

Scopo della presente invenzione è quello di fornire un attuatore MEMS piezoelettrico avente un sensore di deformazione integrato per realizzare un controllo ad anello chiuso che consenta di superare gli inconvenienti della tecnica nota.

Secondo la presente invenzione vengono forniti un attuatore MEMS piezoelettrico, un relativo procedimento di

fabbricazione, una valvola microfluidica e un metodo di controllo di una valvola microfluidica come definiti nelle rivendicazioni allegate.

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

- la figura 1 è una sezione trasversale di un attuatore MEMS piezoelettrico noto;

- le figure 2-5 mostrano sezioni trasversali del presente attuatore MEMS piezoelettrico in fasi di fabbricazione successive;

- la figura 5A mostra una vista dall'alto del presente attuatore MEMS piezoelettrico nella fase di fabbricazione di figura 5;

- le figure 6-10 mostrano sezioni trasversali del presente attuatore MEMS piezoelettrico in fasi di fabbricazione successive;

- la figura 11 mostra una sezione trasversale di una forma di realizzazione di un sistema di attuazione incorporante il presente attuatore MEMS piezoelettrico; e

- la figura 12 mostra una sezione trasversale di un sistema di attuazione incorporante il presente attuatore MEMS piezoelettrico secondo un'ulteriore forma di realizzazione.

La figura 2 mostra una sezione trasversale di una fetta

("wafer") 45, già sottoposta a prime fasi di lavorazione. In dettaglio la fetta 45 comprende un substrato 50 di materiale semiconduttore, ad esempio silicio, avente una prima e una seconda superficie 50A, 50B. Sulla prima superficie 50A del substrato 50 si estende un primo strato di sagomatura 51, ad esempio di ortosilicato tetraetile (TEOS) depositato, avente ad esempio uno spessore di almeno 1 μm , qui di 1 μm .

Successivamente, figura 3, il primo strato di sagomatura 51 viene definito ("patterned") tramite attacco chimico selettivo, in maniera nota al tecnico del ramo, in modo da formare una regione di sagomatura inferiore 52, utile per la realizzazione successiva di una struttura di strozzatura, come descritto in dettaglio in seguito.

Inoltre, uno strato di irrigidimento 53 di materiale semiconduttore, ad esempio polisilicio, viene realizzato, ad esempio cresciuto epitassialmente, sulla prima superficie 50A del substrato 50 e sulla regione di sagomatura inferiore 52; lo strato di irrigidimento 53 viene quindi sottoposto a levigatura chimico-meccanica ("chemical-mechanical polishing"), in modo da realizzare una superficie superiore piana. Lo strato di irrigidimento 53 ha uno spessore maggiore del primo strato di sagomatura 51, in questa forma di realizzazione di 25 μm .

Successivamente, un primo strato isolante 54, ad esempio di ortosilicato tetraetile (TEOS) e avente qui uno spessore

comparabile con quello del primo strato di sagomatura 51, qui di 1 μm , è depositato sullo strato di irrigidimento 53.

In figura 4, uno strato strutturale 55, di materiale semiconduttore quale polisilicio è depositato sopra il primo strato isolante 54. Lo strato strutturale 55 ha uno spessore scelto in base alle caratteristiche meccaniche desiderate, ad esempio, in questa forma di realizzazione, esso presenta uno spessore di 10 μm .

Un secondo strato isolante 56, ad esempio di ortosilicato tetraetile (TEOS) e avente qui uno spessore di 0,5 μm , è depositato sopra lo strato strutturale 55.

In seguito, figura 5, un primo strato conduttivo 70, ad esempio di platino, è depositato sopra il secondo strato isolante 56; uno strato di attuazione 71 di materiale piezoelettrico unimorfo o bimorfo avente una elevata permittività elettrica relativa, ad esempio maggiore di 100, quale piombo-zirconato di titanio (PZT), BaTiO_3 , KNN (niobato di sodio e potassio), PbTiO_2 o PbNb_2O_6 e avente uno spessore compreso tra 1 μm e 3 μm , in particolare di 2 μm , è depositato sopra il primo strato conduttivo 70; un secondo strato conduttivo 72, ad esempio di una lega tungsteno-titanio, di platino, ittrio o ossido di iridio, è depositato sopra lo strato di attuazione 71, formando una pila di strati.

Secondo un aspetto della presente invenzione, lo strato di attuazione 71 può essere formato di materiale

piezoelettrico ceramico.

La pila di strati così ottenuta è definita mediante passaggi litografici e di attacco chimico selettivo, noti al tecnico del ramo, in modo che il primo strato conduttivo 70 formi una regione di elettrodo inferiore 60, lo strato di attuazione 71 formi una regione piezoelettrica di attuazione 61 e il secondo strato conduttivo 72 formi una regione di elettrodo superiore 62.

In particolare, come visibile nella vista dall'alto di figura 5A, la regione di elettrodo superiore 62 e la regione piezoelettrica di attuazione 61 sottostante (non visibile in figura 5A) vengono definiti in una prima fase di attacco e presentano quindi stessa forma; la regione di elettrodo inferiore 60 viene definita in una separata fase di attacco, ad esempio dopo la definizione delle regioni di elettrodo superiore 62 e piezoelettrica di attuazione 61, e comprende una porzione di attuazione 60A, una porzione di rilevamento 60B e una porzione di collegamento 60C. In dettaglio, la porzione di attuazione 60A è approssimativamente sottostante le regioni di elettrodo superiore 62 e piezoelettrica di attuazione 61 e le porzioni di rilevamento 60B e di collegamento 60C si estendono lateralmente alle regioni di elettrodo superiore 62 e piezoelettrica di attuazione 61.

La porzione di attuazione 60A della regione di elettrodo inferiore 60, la regione piezoelettrica di attuazione 61 e la

regione di elettrodo superiore 62 formano una struttura di attuazione attiva 65.

Successivamente, figura 6, uno strato piezoelettrico 73, ad esempio di nitruro di alluminio (AlN) e avente uno spessore compreso tra 0,5 e 3 μm , in particolare di 1 μm , è depositato sopra la prima superficie 50A del substrato 50 ed è definito, tramite litografia ed attacco chimico selettivo, in modo da formare una regione piezoelettrica di rilevamento 80 e una regione di passivazione 81.

La regione di passivazione 81 circonda la struttura di attuazione attiva 65 e si estende su una porzione del secondo strato isolante 56 almeno su un primo lato della struttura di attuazione attiva 65 (a sinistra in figura 6) e forma una prima apertura 82 sovrastante la regione di elettrodo superiore 62.

La regione piezoelettrica di rilevamento 80 si estende al di sopra della porzione di rilevamento 60B, a distanza dalla regione di passivazione 81, qui su un secondo lato della struttura di attuazione attiva 65 (a destra in figura 6).

In figura 7, un terzo strato conduttivo 74, ad esempio di molibdeno, platino, ittrio o ossido di iridio, è depositato al di sopra della fetta 45.

Successivamente, figura 8, il terzo strato conduttivo 74 è definito, in maniera nota al tecnico del ramo, in modo da formare una regione conduttiva di collegamento 85 e una regione

di elettrodo superiore di rilevamento 86.

La regione conduttiva di collegamento 85 si estende sopra la struttura di attuazione attiva 65, in contatto con la regione di elettrodo superiore 62, e sopra la regione di passivazione 81 e collega la regione di elettrodo superiore 62 a piazzole di contatto, qui non mostrate.

La regione di elettrodo superiore di rilevamento 86 si estende sopra la regione piezoelettrica di rilevamento 80 e il secondo strato isolante 56 sul secondo lato della struttura di attuazione attiva 65.

La porzione di rilevamento 60B della regione di elettrodo inferiore 60, la regione piezoelettrica di rilevamento 80 e la regione di elettrodo superiore di rilevamento 86 formano una struttura di rilevamento 90.

In figura 9, un secondo strato di sagomatura 96 viene depositato sulla seconda superficie 50B del substrato 50 e definito litograficamente in modo da formare una finestra 97 sul lato posteriore ("back") della fetta 45, al di sotto della struttura di attuazione attiva 65 e della struttura di rilevamento 90, come discusso in seguito.

Viene quindi effettuato un attacco chimico selettivo, ad esempio un attacco chimico secco, a partire dalla seconda superficie 50B del substrato 50, rimuovendo il materiale semiconduttore di questo in corrispondenza della finestra 97 e di una porzione dello strato di irrigidimento 53 non coperta

dalla regione di sagomatura inferiore 52 e formando una cavità 100. Del substrato 50 rimane quindi una porzione portante 50' e dello strato di irrigidimento 53 rimane una porzione sottostante la struttura di attuazione attiva 65, indicata con 53'.

In figura 10, utilizzando ancora il secondo strato di sagomatura 96 come maschera di attacco, vengono rimossi la regione di sagomatura inferiore 52 e porzioni del primo strato isolante 54 ai lati della porzione 53' dello strato di irrigidimento 53.

La porzione 53' dello strato di irrigidimento 53 e la porzione rimanente (indicata con 54') del primo strato isolante 54 formano una struttura di strozzatura 101; lo strato strutturale 55 e il secondo strato isolante 56, sospesi ora sopra la cavità 100, formano una struttura deformabile 105.

In pratica, qui, la struttura deformabile 105 costituisce una membrana sospesa.

Infine, il secondo strato di sagomatura 96 viene rimosso, la fetta 45 viene tagliata ("diced") e ciascuna piastrina ("die"), dopo usuali fasi di connessione elettrica e incapsulamento, forma un attuatore MEMS piezoelettrico 150.

L'attuatore MEMS piezoelettrico 150 così ottenuto comprende un elettrodo inferiore 110 (includente la porzione di attuazione 60A, la porzione di rilevamento 60B e la porzione di collegamento 60C della regione di elettrodo inferiore 60

di figura 5A), un elettrodo superiore di attuazione 111 (corrispondente alla regione di elettrodo superiore 62) e un elettrodo superiore di rilevamento 112 (corrispondente alla regione di elettrodo superiore di rilevamento 86).

In uso, una tensione di polarizzazione applicata fra l'elettrodo superiore di attuazione 111 e l'elettrodo inferiore 110 causa una deformazione della struttura di attuazione attiva 65, in modo noto. Di conseguenza, la struttura deformabile 105, solidale alla struttura di attuazione attiva 65 e sospesa sulla cavità 100, si deforma. La deformazione della struttura deformabile 105 genera uno stress meccanico nella struttura di rilevamento 90 che è disposta in una porzione periferica della struttura deformabile 105, adiacente alla porzione portante 50', che rappresenta una regione di vincolo per la struttura deformabile 105.

In questo modo, in presenza dello stress meccanico, la regione piezoelettrica di rilevamento 80 genera una tensione di rilevamento tra l'elettrodo inferiore 110 e l'elettrodo superiore di rilevamento 112, che può essere misurata e convertita in un valore di deformazione della struttura deformabile 105, in modo noto. La misura della tensione di rilevamento permette quindi di controllare, tramite un sistema di controllo ad anello chiuso e in tempo reale, lo stato dell'attuatore MEMS piezoelettrico 150.

La misura della tensione di rilevamento è una rilevazione passiva, ovvero non necessita di un passaggio di corrente, ed è quindi favorevole dal punto di vista energetico.

Al fine di ottenere una buona sensibilità di rilevamento, è desiderabile che la regione piezoelettrica di rilevamento 80 abbia un comportamento lineare, non isteretico, e che il rapporto tra tensione di rilevamento e stress meccanico sia elevato.

Di conseguenza, materiali piezoelettrici con una bassa permittività elettrica relativa, ad esempio approssimativamente inferiore o uguale a 10, e una perdita di tangente ad esempio inferiore a 0,05, in particolare uguale a 0,002, sono da preferirsi.

Secondo un aspetto della presente invenzione, i materiali piezoelettrici che formano la regione piezoelettrica di rilevamento 80 possono essere materiali ceramici.

La regione piezoelettrica di rilevamento 80 è formata, qui, di nitruro di alluminio (AlN), che ha una dipendenza tensione di rilevamento-stress meccanico lineare e con rapporto elevato. Tuttavia, altri materiali possono essere utilizzati, quali ossido di zinco e polivinilidenefluoruro (PVDF).

Inoltre, anche la regione di passivazione 81 è formata di nitruro di alluminio. Infatti questo materiale ha ottime proprietà di isolamento elettrico ed è chimicamente stabile

fino a temperature elevate (anche fino a 1077°C) anche in ambiente ossidante quale aria e umidità. Di conseguenza, la realizzazione della regione di passivazione 81 permette la passivazione dell'attuatore MEMS piezoelettrico 150 tramite deposito e definizione di un solo strato di materiale, riducendo quindi i passaggi di fabbricazione e i costi di fabbricazione dell'attuatore MEMS piezoelettrico 150 stesso.

L'attuatore MEMS piezoelettrico 150 può essere utilizzato in apparecchi per, ad esempio, la messa a fuoco automatica di macchine fotografiche, picoproiettori e valvole microfluidiche.

La figura 11 mostra ad esempio l'utilizzazione dell'attuatore MEMS piezoelettrico 150 all'interno di una valvola microfluidica 300.

In dettaglio, la valvola microfluidica 300 comprende un corpo 290 e l'attuatore MEMS piezoelettrico 150, incollato al corpo 290. La valvola microfluidica 300 alloggia un canale fluidico 310 avente una porta di ingresso IN e una porta di uscita OUT.

In dettaglio, il corpo 290 comprende un primo e un secondo corpo di canale 301, 302, tipicamente di materiale semiconduttore, ad esempio silicio, lavorati e reciprocamente incollati ("bonded"), in modo non visibile in figura 11.

Ad esempio, il primo corpo di canale 301 presenta forma generalmente parallelepipedica avente una prima e una seconda

superficie 301A, 301B. Il primo corpo di canale 301 alloggia una porzione orizzontale di canale 309 estendentesi lungo la seconda superficie 301B del primo corpo di canale 301 e chiusa inferiormente dal secondo corpo di canale 302.

Un'apertura passante 303 si estende attraverso il primo corpo di canale 301, fra la prima superficie 301A e la porzione orizzontale di canale 309.

Il secondo corpo di canale 302 ha, in questa forma di realizzazione, forma generalmente parallelepipedica avente una superficie superiore 302A incollata alla seconda superficie 301B del primo corpo di canale 301. Il secondo corpo di canale 302 presenta una sporgenza 305 estendentesi dalla superficie superiore 302A del secondo corpo di canale 302 all'interno dell'apertura passante 303 del primo corpo di canale 301.

La porzione portante 50' dell'attuatore MEMS piezoelettrico 150 è incollata qui alla prima superficie 301A del primo corpo di canale 301, in modo che la struttura di strozzatura 101 sia affacciata a distanza ad una estremità della sporgenza 305 e delimitata, con questa, un passaggio 315 del canale fluidico 310. In pratica, la sporgenza 305 e la struttura di strozzatura 101 formano una porzione di strozzatura 312 della valvola microfluidica 300.

Il passaggio 315, l'apertura passante 303 e la porzione orizzontale di canale 309 formano quindi il canale fluidico 310.

In aggiunta, la valvola microfluidica 300 comprende una unità di controllo 320 accoppiata all'attuatore MEMS piezoelettrico 150, in particolare alla struttura di attuazione attiva 65 e alla struttura di rilevamento 90, attraverso piazzole di contatto qui non mostrate, per lo scambio dei segnali e delle grandezze elettriche utilizzate per il controllo della valvola microfluidica 300 stessa.

A tale scopo, l'unità di controllo 320 comprende porte di ingresso/uscita 321, 322 per il ricevimento di segnali di comando e l'invio di segnali di rilevamento verso l'esterno (ad esempio verso un utente), uno stadio di comando 323 (ad esempio una CPU) per l'elaborazione dei segnali previsti per il controllo, ed uno stadio di pilotaggio 324, per il comando dell'attuatore MEMS piezoelettrico 150. Lo stadio di comando 323 può ad esempio memorizzare tavole di conversione fra flusso nominale (desiderato) e valore di tensione di polarizzazione di attuazione da fornire all'attuatore MEMS piezoelettrico 150.

In uso, un utente può impostare, attraverso le porte di ingresso 321, un valore nominale di flusso di un fluido all'interno del canale fluidico 310. In base alle tavole memorizzate, l'unità di controllo 320 applica una tensione di polarizzazione di valore opportuno alla struttura di attuazione attiva 65, causandone una deformazione. La struttura deformabile 105 quindi si deforma, avvicinando, in

base al valore della tensione di polarizzazione, la struttura di strozzatura 101 all'estremità della sporgenza 305 del secondo corpo di canale 302, così da impostare la sezione del passaggio 315 del canale fluidico 310 e quindi il flusso.

Parallelamente, e come spiegato precedentemente, lo stress meccanico causato dalla deformazione della struttura deformabile 105 genera, nella struttura di rilevamento 90, una tensione di rilevamento che viene fornita all'unità di controllo 320.

L'unità di controllo 320 confronta il valore della tensione di rilevamento, o grandezze ad essa correlate, con opportuni parametri di calibrazione corrispondenti ad un valore di flusso e verifica, in tempo reale, che il flusso del fluido sia conforme al valore nominale. In caso negativo, l'unità di controllo 320 può modificare la tensione di polarizzazione applicata alla struttura di attuazione attiva 65 in modo da rendere il flusso conforme al valore nominale.

La figura 12 mostra un'altra forma di realizzazione del presente attuatore MEMS piezoelettrico, in seguito indicato con il numero di riferimento 350, utilizzato all'interno di una valvola microfluidica, qui indicata con 400. L'attuatore MEMS piezoelettrico 350 e la valvola microfluidica 400 hanno struttura generale e funzionamento simili, rispettivamente, all'attuatore MEMS piezoelettrico 150 e alla valvola microfluidica 300, quindi elementi in comune sono indicati con

gli stessi numeri di riferimento.

In particolare, qui, il canale fluidico 310 e l'attuatore MEMS piezoelettrico 350 sono realizzati all'interno di un corpo 390, di materiale semiconduttore, ad esempio silicio.

In dettaglio, anche qui, la struttura di attuazione attiva 65 e la struttura di rilevamento 90 sono disposte sulla struttura deformabile 105.

Qui, la struttura deformabile 105 è sospesa su una cavità 410 e sia la struttura deformabile 105 sia la cavità 410 sono formate dal corpo 390. In pratica, qui, non è più presente una apertura passante e la sporgenza 305 si estende all'interno della cavità 410. Qui, quindi, la porzione di strozzatura 312 è delimitata dalla sporgenza 305 e dalla struttura deformabile 105, la quale costituisce anche la struttura di strozzatura dell'attuatore MEMS piezoelettrico 350.

Risulta infine chiaro che all'attuatore MEMS piezoelettrico 150, 350, alla valvola microfluidica 300, 400, al metodo di controllo della valvola microfluidica e al procedimento di fabbricazione qui descritti ed illustrati possono essere apportate modifiche e varianti senza per questo uscire dall'ambito protettivo della presente invenzione, come definito nelle rivendicazioni allegate.

Ad esempio, le diverse forme di realizzazione descritte possono essere combinate in modo da fornire ulteriori soluzioni.

Ad esempio, la struttura deformabile 105 può essere formata da strutture diverse dalla membrana, ad esempio da una trave a sbalzo, un diaframma o una struttura con conformazione particolare, utile in applicazioni specifiche.

La struttura di attuazione attiva può avere comportamento bimorfo utilizzando un materiale unimorfo, come ad esempio descritto nella domanda di brevetto europea EP3441358A1.

Gli strati formanti la struttura deformabile e la struttura di strozzatura possono avere spessori differenti, a seconda della deformazione e dell'applicazione desiderata.

Inoltre, il canale fluidico può avere forma differente.

L'unità di controllo 320 può essere integrata nell'attuatore MEMS piezoelettrico 150 o nel corpo 290; 390, oppure essere costituita da un dispositivo a sé, ad esempio un ASIC.

Inoltre, l'elettrodo inferiore di attuazione e l'elettrodo inferiore di rilevamento possono essere formate da regioni conduttive distinte.

RIVENDICAZIONI

1. Attuatore MEMS (150, 350) comprendente:
 - un substrato (50'; 390) circondante una cavità (100; 410);
 - una struttura deformabile (105) sospesa sulla cavità;
 - una struttura di attuazione (65) comprendente una prima regione piezoelettrica (61), portata dalla struttura deformabile e configurata per provocare una deformazione della struttura deformabile; e
 - una struttura di rilevamento (90) comprendente una seconda regione piezoelettrica (80), portata dalla struttura deformabile e configurata per rilevare la deformazione della struttura deformabile.
2. Attuatore secondo la rivendicazione 1, comprendente inoltre una regione di passivazione (81), che circonda la struttura di attuazione (65) ed è formata dallo stesso materiale della seconda regione piezoelettrica (80).
3. Attuatore secondo la rivendicazione 2, in cui la seconda regione piezoelettrica (80) e la regione di passivazione (81) sono di un primo materiale piezoelettrico.
4. Attuatore secondo la rivendicazione precedente, in cui la prima regione piezoelettrica (61) è di un secondo materiale piezoelettrico.
5. Attuatore secondo la rivendicazione precedente, in cui il primo materiale piezoelettrico ha una permittività

elettrica relativa inferiore o uguale a 10 e/o una perdita di tangente inferiore a 0,05 scelto nel gruppo comprendente nitruro di alluminio (AlN), polivinilidenefluoruro (PVDF) e ossido di zinco; e in cui il secondo materiale piezoelettrico ha una permittività elettrica relativa maggiore di 100, scelto nel gruppo comprendente piombo-zirconato di titanio (PZT), BaTiO₃, niobato di sodio e potassio (KNN), PbTiO₂ e PbNb₂O₆.

6. Attuatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui la struttura di attuazione (65) comprende una prima pila di regioni includente un elettrodo inferiore di attuazione (110), la prima regione piezoelettrica (61) e un elettrodo superiore di attuazione (111) e la struttura di rilevamento (90) comprende una seconda pila di regioni includente un elettrodo inferiore di rilevamento (110) la seconda regione piezoelettrica (80) e un elettrodo superiore di rilevamento (112).

7. Attuatore secondo la rivendicazione precedente, in cui l'elettrodo inferiore di attuazione e l'elettrodo inferiore di rilevamento sono formati da una singola regione conduttiva (60).

8. Attuatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui la struttura deformabile (105) presenta una prima ed una seconda superficie, fra loro opposte, la struttura di attuazione (65) è disposta sulla prima superficie e l'attuatore comprende inoltre una struttura di strozzatura

(101) formata da una regione sporgente disposta sulla seconda superficie.

9. Attuatore secondo la rivendicazione precedente, in cui la struttura di strozzatura (101) si estende verso l'interno della cavità (100).

10. Valvola microfluidica (300, 400) comprendente:

- un corpo (290; 390);
- un canale fluidico (310) all'interno del corpo avente una porzione di strozzatura (312) definente un passaggio (315) avente una sezione di passaggio;

- l'attuatore MEMS (150; 350) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui la struttura deformabile (105) è accoppiata alla porzione di strozzatura (312) ed è configurata in modo da modificare la sezione di passaggio;

- un'unità di controllo (320), accoppiata all'attuatore MEMS e configurata in modo da fornire una tensione di polarizzazione alla struttura di attuazione (65) e da ricevere una tensione di rilevamento dalla struttura di rilevamento (90).

11. Valvola microfluidica secondo la rivendicazione precedente, in cui il canale fluidico (310) comprende una porzione di ingresso e una porzione di uscita, la porzione di strozzatura (312) è disposta fra la porzione di ingresso e la porzione di uscita; un organo di strozzatura disposto nella

porzione di strozzatura, accoppiato alla struttura deformabile e/o ad una parete del canale fluidico e configurato per modificare la sezione di passaggio in seguito alla deformazione della struttura deformabile.

12. Valvola microfluidica secondo la rivendicazione precedente, in cui il canale fluidico (310) comprende inoltre una apertura (303; 410) estendentesi trasversalmente alla porzione di ingresso e alla porzione di uscita; e l'organo di strozzatura comprende una sporgenza (305) estendentesi dalla parete del canale fluidico attraverso l'apertura (303; 410) e avente una estremità affacciata, a distanza, alla struttura deformabile (105) e formante con questa il passaggio (315).

13. Valvola microfluidica secondo la rivendicazione precedente, in cui il corpo (290) presenta una faccia di incollaggio (301A); l'attuatore MEMS (150) è fissato ("bonded") alla faccia di incollaggio del corpo (290); l'apertura (303) si estende dalle porzioni di ingresso e di uscita del canale fluidico fino alla faccia di incollaggio; la cavità (100) dell'attuatore MEMS è rivolta ed è in collegamento fluidico con l'apertura.

14. Metodo di controllo della valvola microfluidica (300, 400) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 10-13, comprendente le fasi di:

- fornire, da parte dell'unità di controllo (320), la tensione di polarizzazione alla struttura di attuazione (65)

in modo che una quantità di flusso nominale scorra nel canale fluidico (310);

- fornire, da parte della struttura di rilevamento (90) all'unità di controllo (320), la tensione di rilevamento tra l'elettrodo inferiore di rilevamento (110) e l'elettrodo superiore di rilevamento (112), la tensione di rilevamento essendo correlata ad una quantità di flusso misurata;

- confrontare una grandezza elettrica correlata alla tensione di rilevamento con un valore corrispondente alla quantità di flusso nominale; e

- applicare una nuova tensione di polarizzazione se la quantità di flusso misurata e la quantità di flusso nominale sono differenti.

15. Procedimento di fabbricazione di un attuatore MEMS, comprendente le fasi di:

formare una cavità (100) in un substrato (50) di una fetta (45) di materiale semiconduttore, definendo una struttura deformabile (105) sospesa sulla cavità;

formare una struttura di attuazione (65) comprendente una prima regione piezoelettrica (61) portata dalla struttura deformabile; e

formare una struttura di rilevamento (90) comprendente una seconda regione piezoelettrica (80) portata dalla struttura deformabile.

16. Procedimento di fabbricazione secondo la

rivendicazione precedente, in cui:

formare una struttura di attuazione (65) comprende:

formare una regione di elettrodo inferiore di attuazione (60A) a partire da un primo strato di materiale conduttivo (70);

formare la prima regione piezoelettrica (61), sopra la regione di elettrodo inferiore di attuazione, a partire da un primo strato di materiale piezoelettrico (71); e

formare una regione di elettrodo superiore di attuazione (62), sopra la prima regione piezoelettrica, a partire da un secondo strato di materiale conduttivo (72); e

formare una struttura di rilevamento (90) comprende:

formare una regione di elettrodo inferiore di rilevamento (60B) a partire dal primo strato di materiale conduttivo (70);

formare la seconda regione piezoelettrica (80), sopra la regione di elettrodo inferiore di rilevamento, a partire da un secondo strato di materiale piezoelettrico (73); e

formare una regione di elettrodo superiore di rilevamento (86), sopra la seconda regione piezoelettrica, a partire da un terzo strato di materiale conduttivo (74).

17. Procedimento di fabbricazione secondo la rivendicazione precedente, in cui formare la seconda regione piezoelettrica comprende depositare il secondo strato di materiale piezoelettrico (73) e definire il secondo strato di materiale piezoelettrico, formando la seconda regione

piezoelettrica (80) e una regione di passivazione (81) circondate la struttura di attuazione (65).

18. Procedimento di fabbricazione secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 15-17, in cui formare una cavità (100) in un substrato (50) comprende le fasi di:

formare, su una prima superficie (50A) del substrato, una regione di sagomatura (52);

formare, sulla regione di sagomatura, una regione di irrigidimento (53');

formare, sulla regione di irrigidimento, uno strato strutturale (55);

rimuovere selettivamente il substrato (50) a partire da una seconda superficie (50B) fino alla regione di sagomatura, opposta alla prima superficie, formando la cavità (100), in cui la regione di irrigidimento forma una struttura di strozzatura (101) sporgente dallo strato strutturale verso la cavità.

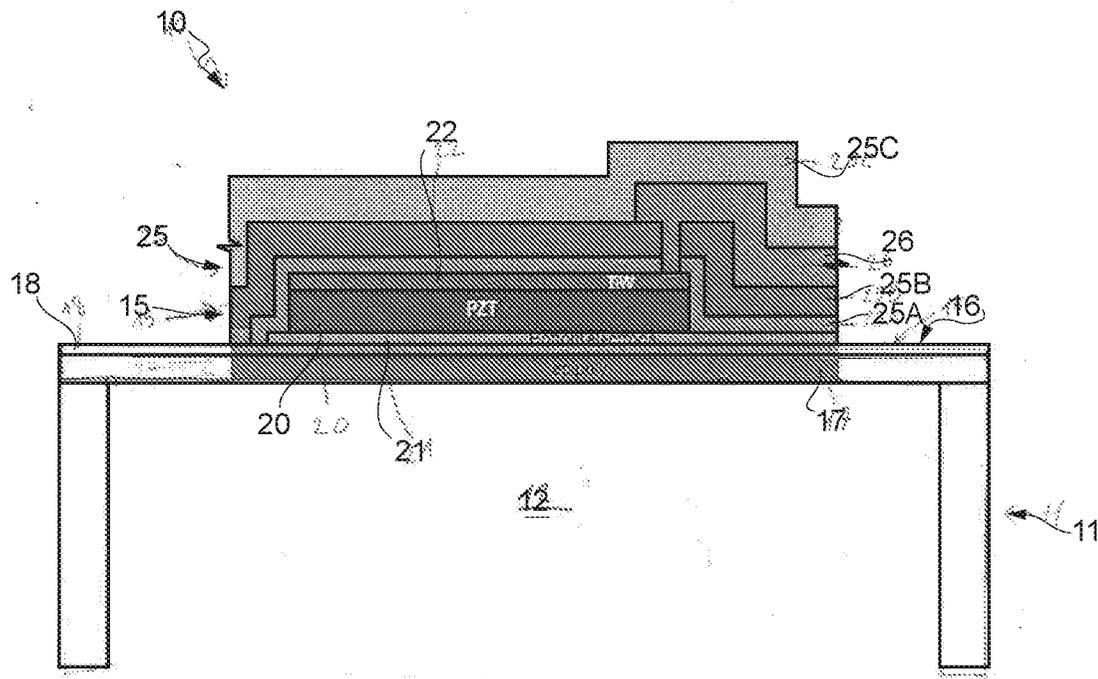


FIG. 1

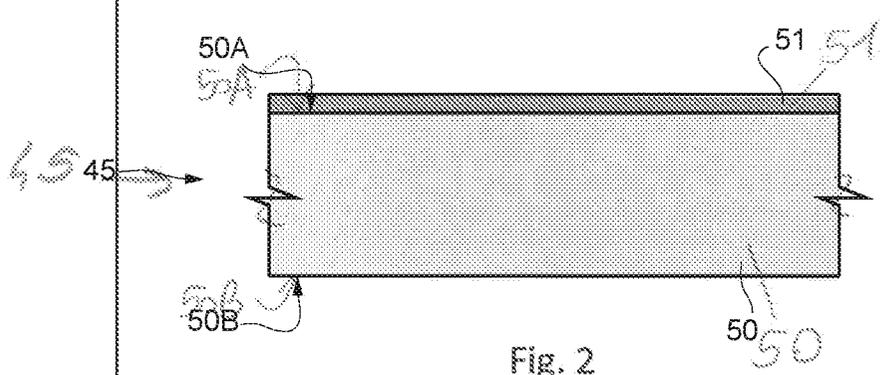


Fig. 2
FIG. 2

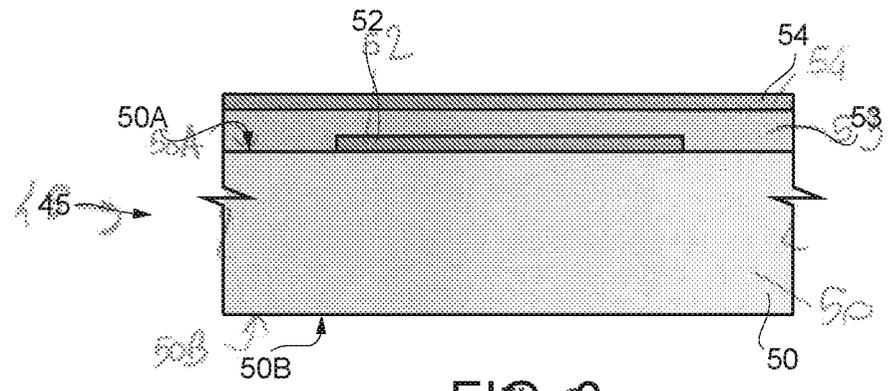


FIG. 3

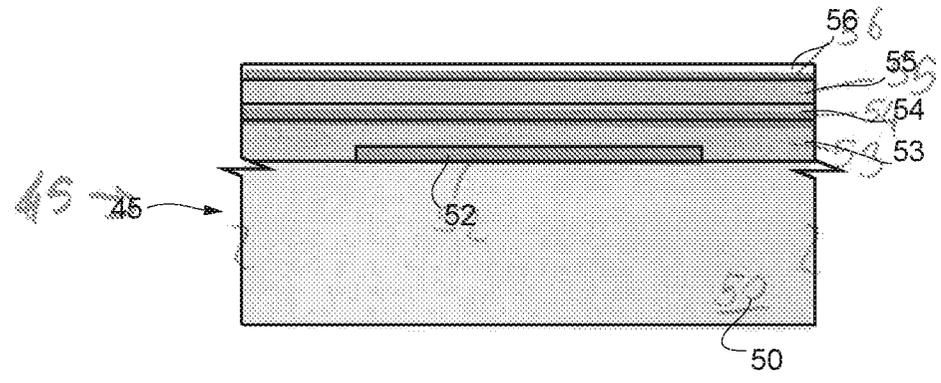


FIG. 4

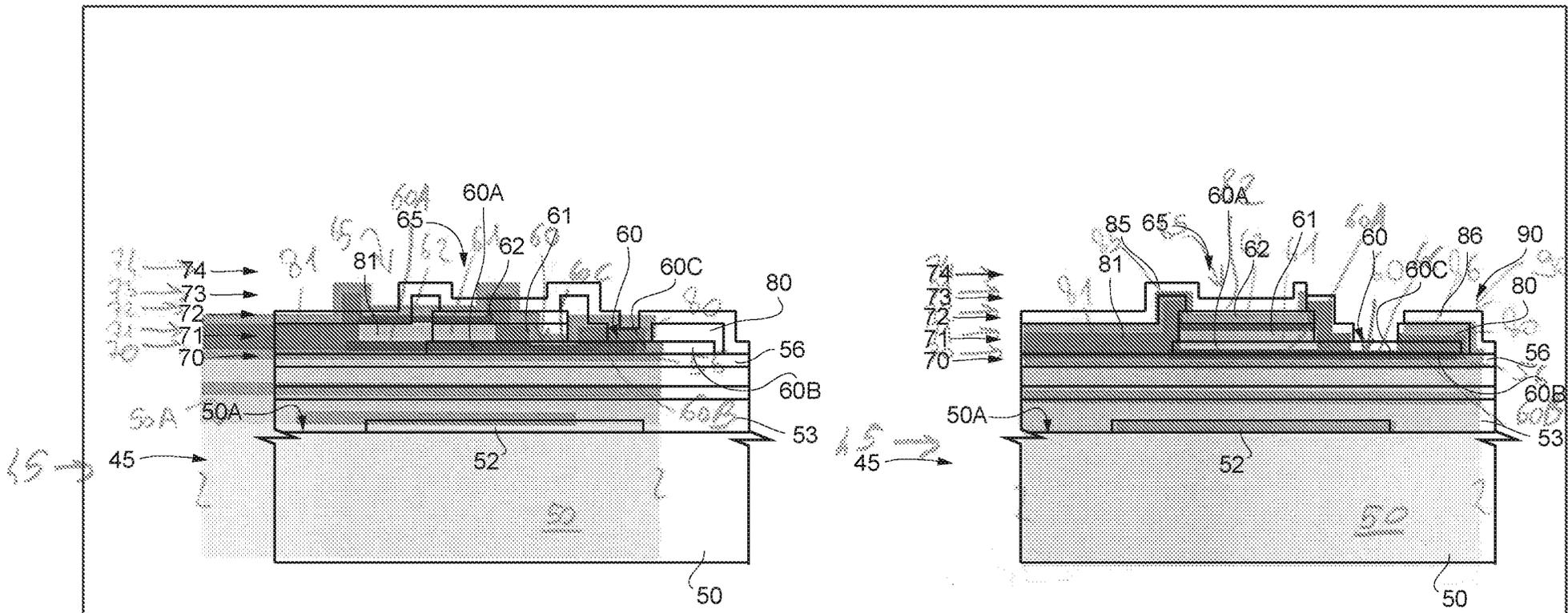


Fig. 7
FIG. 7

Fig. 8
FIG. 8

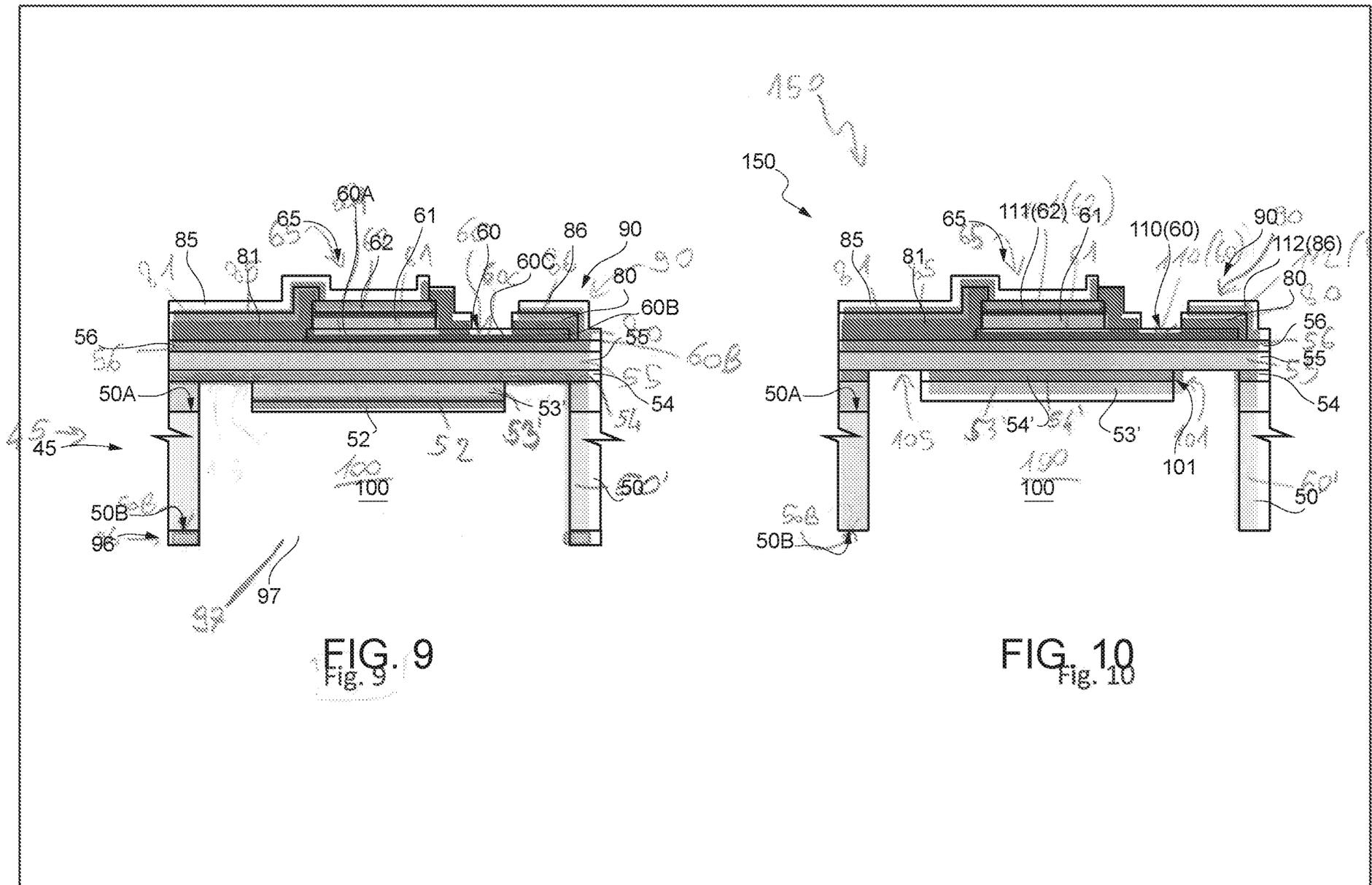


FIG. 9
Fig. 9

FIG. 10
Fig. 10

