

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102008901690341A1

Publication Date

20100623

Applicant

STMICROELECTRONICS (ROUSSET) SAS

Title

TRASDUTTORE ACUSTICO INTEGRATO IN TECNOLOGIA MEMS E
RELATIVO PROCESSO DI FABBRICAZIONE

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"TRASDUTTORE ACUSTICO INTEGRATO IN TECNOLOGIA MEMS E
RELATIVO PROCESSO DI FABBRICAZIONE"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI, 2

AGRATE BRIANZA (MI)

Inventori: CONTI Sebastiano, PERLETTI Matteo

La presente invenzione è relativa ad un trasduttore acustico integrato in tecnologia MEMS ed al relativo processo di fabbricazione, ed in particolare ad un microfono microelettromeccanico (MEMS) di tipo capacitivo.

Come noto, un trasduttore acustico, ad esempio un microfono MEMS, di tipo capacitivo comprende generalmente un elettrodo mobile, realizzato come diaframma o membrana, disposto affacciato ad un elettrodo fisso, a realizzare i piatti di un condensatore. L'elettrodo mobile è generalmente ancorato, mediante una sua porzione perimetrale, ad un substrato, mentre una sua porzione centrale è libera di muoversi o flettersi in risposta ad una pressione di onda sonora agente su una superficie dell'elettrodo mobile. Poiché l'elettrodo mobile e l'elettrodo fisso realizzano un condensatore, la flessione

della membrana che costituisce l'elettrodo mobile causa una variazione di capacità del condensatore. In uso, tale variazione di capacità viene trasformata in segnale elettrico, fornito come segnale di uscita del microfono.

Alternativamente a microfoni MEMS di tipo capacitivo, sono noti microfoni MEMS in cui il movimento della membrana è rilevato per mezzo di elementi di tipo piezoresistivo, piezoelettrico, ottico, o anche sfruttando l'effetto tunnel.

Microfoni MEMS di tipo noto sono tuttavia soggetti a problemi derivanti da stress residui (compressivi o tensili) interni allo strato che realizza la membrana. I fattori che incidono sullo stress sono molteplici, e sono dovuti ad esempio alle proprietà dei materiali utilizzati, alle tecniche di deposizione di tali materiali, alle condizioni (temperatura, pressione, ecc.) a cui avviene la deposizione e ad eventuali successivi trattamenti termici.

Stress residui sono spesso causa di deformazioni meccaniche della membrana, come ad esempio incurvamenti, e possono influire in modo significativo sulle prestazioni del microfono MEMS, ad esempio riducendone la sensibilità.

Pur essendo possibile controllare l'ammontare di stress residuo nella membrana mediante un opportuno progetto della membrana stessa e valutando le condizioni di fabbricazione ottime, il risultato ottenuto non è

soddisfacente per applicazioni in cui è richiesta una elevata sensibilità. In questi casi infatti il comportamento meccanico in risposta a sollecitazioni di onde sonore è comunque dominato dal livello di stress residuo nella membrana.

Per superare questi problemi, in WO 2008/103672 viene descritto un microfono MEMS di tipo capacitivo in cui l'elettrodo mobile è sospeso su una cavità per mezzo di un singolo elemento di ancoraggio solidale ad una trave di supporto realizzata nello stesso strato in cui è formato l'elettrodo fisso. Il punto di accoppiamento dell'elemento di ancoraggio con l'elettrodo mobile è situato nel centro della membrana che forma l'elettrodo mobile. In questo modo l'elettrodo mobile può rilasciare gli stress residui attraverso libere contrazioni o espansioni radiali.

Tuttavia, questa soluzione è valida solo nei casi in cui gli stress residui nella trave di supporto siano ridotti. Se, invece, la trave di supporto è sottoposta a stress tensili o compressivi, essa tende ad incurvarsi in modo imprevedibile, causando una deformazione o un'inclinazione dell'elettrodo mobile che viene quindi a trovarsi in posizione non parallela all'elettrodo fisso.

Inoltre, una membrana ancorata al centro è molto sensibile alle deformazioni dovute al gradiente di stress.

Possono quindi verificarsi problemi di ridotta

sensibilità del microfono durante l'uso, e, in casi più gravi, un contatto diretto tra l'elettrodo mobile e l'elettrodo fisso.

Scopo della presente invenzione è fornire un trasduttore acustico integrato in tecnologia MEMS ed il relativo processo di fabbricazione privi degli inconvenienti dell'arte nota.

Secondo la presente invenzione viene realizzato un trasduttore acustico integrato in tecnologia MEMS ed il relativo processo di fabbricazione come definito nelle rivendicazioni 1 e 12.

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

- la figura 1 mostra, in vista dall'alto, un assemblaggio di piatto rigido e membrana mobile di un trasduttore acustico secondo una forma di realizzazione della presente invenzione;

- la figura 2 mostra una vista in sezione di un assemblaggio di piatto rigido e membrana mobile del trasduttore acustico di figura 1, lungo una linea di sezione II-II di figura 1;

- la figura 3 mostra una vista in sezione di un assemblaggio di piatto rigido e membrana mobile del

trasduttore acustico di figura 1, lungo una linea di sezione III-III di figura 1;

- la figura 4a mostra una porzione di membrana mobile del trasduttore acustico di figure 1-3, pari ad un quarto della membrana mobile, sottoposta a deformazioni di tipo compressivo, durante una simulazione di utilizzo;

- la figura 4b mostra una porzione di membrana mobile del trasduttore acustico di figure 1-3, pari ad un quarto della membrana mobile, sottoposta a deformazioni di tipo tensile, durante una simulazione di utilizzo;

- la figura 5 è un grafico che mostra curve di andamento della frequenza relativamente ad un primo modo vibrazionale della membrana mobile del trasduttore acustico di figure 1-3 in funzione degli stress residui nella membrana mobile stessa;

- le figure 6-14 mostrano una vista in sezione di metà dell'assemblaggio di figura 2 durante fasi di fabbricazione successive;

- la figura 15 mostra un dispositivo che utilizza un trasduttore acustico secondo la presente invenzione.

- le figure 16 e 17 mostrano, in vista dall'alto, rispettivi assemblaggi di piatto rigido e membrana mobile di un trasduttore acustico secondo ulteriori forme di realizzazione della presente invenzione; e

- le figure 18a-18c mostrano forme di realizzazione

alternative di molle ad intaglio della membrana mobile.

Le figure 1-3 mostrano, rispettivamente, una vista dall'alto e viste in sezione di un assemblaggio di una membrana ed un piatto rigido di un trasduttore acustico integrato in tecnologia MEMS, ad esempio microfono microelettromeccanico, secondo una forma di realizzazione della presente invenzione. Per semplicità, nel seguito ci si riferirà a tale assemblaggio generalmente come microfono MEMS 1, pur non essendo mostrata l'elettronica di alimentazione del microfono e di condizionamento dei segnali, comunque necessaria e pur non essendo la descrizione limitata in modo particolare ad un microfono, ma essendo valida per qualsiasi trasduttore acustico.

Con riferimento congiunto alle figure 1 e 2, il microfono MEMS 1 è un microfono di tipo capacitivo e comprende una membrana 2, mobile e di materiale conduttivo, affacciata ad un piatto rigido 3 ("back plate"), di tipo fisso e formato da un primo strato di piatto 3a, di materiale conduttivo e affacciato alla membrana 2, e da un secondo strato di piatto 3b, di materiale isolante, sovrapposto al primo strato di piatto 3a ad eccezione di porzioni in cui si estende attraverso il primo strato di piatto 3a per formare protuberanze che dipartono dal piatto rigido 3, in prolungamento di esso verso la membrana 2. Tali protuberanze formano primi elementi di antiadesione 6,

aventi la funzione, durante l'uso, di impedire un contatto diretto tra la membrana 2 ed il piatto rigido 3, che potrebbe compromettere in modo grave le funzionalità del microfono MEMS 1.

Inoltre, il secondo strato di piatto 3b svolge anche, almeno parzialmente, una funzione di sostegno del primo strato di piatto 3a. In questo modo è possibile disaccoppiare la fase di progetto della porzione meccanica di sostegno (secondo strato di piatto 3b) dalla fase di progetto della porzione di rilevazione capacitiva (primo strato di piatto 3a), aumentando i gradi di libertà di progetto.

La membrana 2 è parzialmente sospesa al di sopra di un substrato 10 e direttamente affacciata ad una cavità 5 ("back chamber"), realizzata scavando un retro 10a del substrato 10 ed avente la funzione di camera di pressione di riferimento. La cavità 5 comprende un prima camera 5a, avente ad esempio forma circolare, diametro inferiore al diametro della membrana 2 e profondità compresa tra 50µm e 150µm, preferibilmente pari a 100µm; ed una seconda camera 5b, disposta al di sotto della prima camera 5a e con essa direttamente comunicante, avente ad esempio forma circolare, diametro pari o superiore al diametro della membrana 2 e profondità compresa tra 350µm e 500µm, preferibilmente pari a 400 µm. La seconda camera 5b occupa

pertanto un'area maggiore dell'area occupata dalla prima camera 5a. In questo modo è possibile massimizzare contemporaneamente la sovrapposizione tra la membrana 2 ed il substrato 10 ed il volume globale della cavità 5, migliorando in questo modo la risposta a basse frequenze del microfono MEMS 1 durante l'uso.

La membrana 2 è ancorata al substrato 10 per mezzo di ancoraggi di membrana 11, realizzati come protuberanze della membrana 2 (ad esempio, come meglio visibile in figura 1, in numero di quattro protuberanze) in zone periferiche della membrana 2. Uno strato di isolamento 12, ad esempio di nitruro di silicio (SiN), disposto sul substrato 10 consente, tra l'altro, di isolare elettricamente gli ancoraggi di membrana 11 dal substrato 10. Gli ancoraggi di membrana 11 hanno la funzione, oltre che di ancorare la membrana 2 al substrato 10, anche di sospendere la membrana 2 al di sopra del substrato 10, a distanza da esso. Lo spessore degli ancoraggi di membrana 11 deve pertanto essere scelto come compromesso di funzionalità del microfono MEMS 1, ad esempio compreso tra $0.5\mu\text{m}$ e $2\mu\text{m}$, preferibilmente pari a $1.3\mu\text{m}$. La membrana 2 deve infatti essere disposta ad una distanza dal substrato 10 tale da ottenere il compromesso voluto fra linearità di risposta alle basse frequenze e rumorosità del microfono, introdotto da fenomeni di smorzamento di tipo "squeeze film"

dovuti alla vicinanza della membrana 2 al substrato 10 nelle regioni di sovrapposizione.

Vantaggiosamente, la membrana 2 possiede una pluralità di secondi elementi di antiadesione 4, realizzati come protuberanze estendentisi a partire dalla superficie inferiore della membrana 2 verso il substrato 10. I secondi elementi di antiadesione 4 hanno la funzione, durante le fasi di fabbricazione e durante l'utilizzo del microfono MEMS 1, di evitare il verificarsi di eventi di adesione della membrana 2 allo strato di isolamento 12 sottostante.

Il piatto rigido 3 è ancorato al substrato 10 per mezzo di ancoraggi di piatto 14 realizzati in zone periferiche del piatto rigido 3, e comprendenti l'intero o parte del bordo perimetrale del piatto rigido 3. Più in dettaglio, il piatto rigido 3 è ancorato al substrato 10 attraverso elementi di supporto di piatto rigido 15, ad esempio pilastri realizzati dello stesso materiale del piatto rigido 3, disposti al di sopra del substrato 10 e dello strato di isolamento 12 ed elettricamente isolati dal substrato 10 tramite lo strato di isolamento 12 interposto. Inoltre, il piatto rigido 3 poggia perifericamente su porzioni di un primo strato sacrificale 16, di un secondo strato sacrificale 17 e di un terzo strato sacrificale 18, esterne all'area occupata dalla membrana 2 ed ai pilastri 15. Alternativamente ai pilastri, gli elementi di supporto

di piatto rigido 15 possono comprendere muri o terrapieni. I pilastri, i muri e i terrapieni possono vantaggiosamente comprendere una propria porzione interna costituita di polisilicio, nitruro o oro, in modo da essere difficilmente soggetti a fenomeni di deformazione. I pilastri, i muri o i terrapieni hanno infatti la funzione di evitare una flessione indesiderata del piatto rigido 3.

Il piatto rigido 3 comprende inoltre una pluralità di fori 8, di forma qualsiasi, preferibilmente circolare, aventi la funzione di favorire, durante le fasi di fabbricazione, la rimozione degli strati sacrificali sottostanti (come meglio spiegato nel seguito) e, in uso, di consentire la libera circolazione di aria tra il piatto rigido 3 e la membrana 2, riducendo l'effetto di smorzamento "squeeze film". Inoltre, in uso, in fori 8 hanno la funzione di porta di ingresso acustico, per permettere a onde di pressione sonora 19, schematizzate in figura come frecce, di deformare la membrana 2. Alternativamente, in modo non mostrato in figura, le onde di pressione sonora 19 possono raggiungere la membrana 2 attraverso la cavità 5, che assolve dunque, in questo secondo caso, la funzione di porta di ingresso acustico.

Al fine di consentire il rilascio degli stress (tensili e/o compressivi) residui nella membrana 2, ad esempio quelli derivanti dal processo di fabbricazione,

vengono formate trincee 20 nella membrana 2, in particolare in corrispondenza di e affacciate a ciascun ancoraggio di membrana 11. Ciascuna trincea 20 è definita da una propria lunghezza L, da una propria larghezza P, e da una distanza W tra la trincea 20 ed il rispettivo ancoraggio di membrana 11 (o il bordo perimetrale della membrana 2) a cui la trincea 20 è affacciata. Lo spessore di ciascuna trincea è pari allo spessore della membrana 2.

Ad esempio, considerando una membrana 2 di forma circolare, con diametro compreso tra 500 μ m e 900 μ m, ciascuna trincea 20 può avere una lunghezza L compresa tra 80 μ m e 140 μ m, preferibilmente pari a circa 100 μ m, una larghezza P compresa tra 2 μ m e 6 μ m, preferibilmente pari a circa 4 μ m ed una distanza W tra la trincea 20 ed il rispettivo ancoraggio di membrana 11 compresa tra 10 μ m e 40 μ m, preferibilmente pari a circa 25 μ m.

Nell'esempio mostrato in figura 1, ciascuna trincea 20 ha, in vista dall'alto, una forma curva ad arco che segue il profilo circolare del bordo perimetrale della membrana 2. Come meglio visibile in figura 2, ciascuna trincea 20 taglia la membrana 2 lungo l'intero spessore, definendo in questo modo un elemento a molla realizzato internamente alla membrana 2 e come parte integrante della membrana 2 stessa. In uso, ciascuna trincea 20 è atta ad agire in trazione e compressione come una molla, permettendo

contrazioni ed espansioni radiali della membrana 2 lungo una direzione giacente in uno stesso piano in cui giace la membrana 2.

Variando i parametri di lunghezza L e larghezza P e distanza W dal bordo della membrana 2 di ciascuna trincea 20, è possibile variare le caratteristiche compressive/estensive di ciascuna trincea 20, rendendo la frequenza di oscillazione della membrana 2 scarsamente dipendente dagli stress residui.

La figura 3 mostra una vista in sezione del microfono MEMS 1 lungo una sezione III-III di figura 1.

Con riferimento congiunto alle figure 1 e 3, il microfono MEMS 1 comprende inoltre un contatto di membrana 21 ed un contatto di piatto rigido 22, di materiale conduttivo, utilizzati, durante l'uso del microfono MEMS 1, per polarizzare la membrana 2 ed il piatto rigido 3 e prelevare un segnale di variazione di capacità conseguente ad una deformazione della membrana 2 causata da onde di pressione sonora 19 incidenti sulla membrana 2 stessa.

Come mostrato in figura 3, il contatto di membrana 21 è formato in parte nello stesso strato in cui è realizzato il piatto rigido 3, ma è da esso elettricamente separato, ad esempio sagomando opportunamente il piatto rigido 3 in modo da evitare un contatto elettrico con il contatto di membrana 21. Più in dettaglio, il contatto di membrana 21

comprende un plug 23, conduttivo, in contatto elettrico diretto con la membrana 2, eventualmente una porzione di connessione di plug 24, conduttiva ed in contatto elettrico con il plug 23, ed una pista conduttiva di membrana 25, ad esempio in materiale metallico, comprendente una piazzola di contatto 25' in contatto elettrico con il plug 23 attraverso porzione di connessione di plug 24 (quando quest'ultima è presente).

Il contatto di piatto 22 (visibile in figura 1 in vista dall'alto) può essere vantaggiosamente realizzato interamente nello stesso strato in cui è realizzato il piatto rigido 3, ad esempio dello stesso materiale del piatto rigido 3, e comprende una pista conduttiva 26 in contatto elettrico con il piatto rigido 3 mediante una porzione di contatto di piatto 26'.

Le figure 4a e 4b mostrano ciascuna una porzione di membrana 2, pari ad un quarto della membrana 2, sottoposta a deformazioni di tipo compressivo (figura 4a) e a deformazioni di tipo tensile (figura 4b), durante una simulazione di uso. Le figure 4a e 4b sono rappresentate graficamente utilizzando una scala di grigio in cui zone in grigio chiaro sono zone a basso stress 27 e zone più scure sono zone ad elevato stress 28.

Dalle figure 4a e 4b si nota che le zone ad elevato stress 28 sono zone della membrana 2 non sottese dall'arco

formato da ciascuna trincea 20, più in particolare sono zone periferiche della membrana 2 includenti il bordo perimetrale della membrana 2 e comprese tra due trincee 20 adiacenti. La presenza delle trincee 20 permette di ridurre notevolmente il livello di stress sul resto della membrana 2 (i.e., le zone a basso stress 27).

La figura 5 è un grafico che mostra curve 29, 30 e 31 di andamento della frequenza relativamente ad un primo modo vibrazionale della membrana 2 in funzione degli stress residui. Le curve 29, 30 sono state ottenute fissando i valori di distanza W e di larghezza P per ciascuna trincea 20 per due diversi valori di lunghezza L. La curva 31 mostra invece il caso di una membrana 2 priva delle trincee 20.

Come si può notare, introducendo le trincee 20 ed aumentando la loro lunghezza L, la frequenza in funzione degli stress residui varia più lentamente.

Le figure 6-14 mostrano fasi di fabbricazione successive per realizzare un microfono MEMS analogo al microfono MEMS 1 di figure 1-3, provvisto di trincee 20.

Inizialmente, figura 6, viene disposto un substrato 10 di una fetta ("wafer") 34, di silicio di tipo N, avente ad esempio spessore compreso tra 400 μ m e 800 μ m, preferibilmente pari a 725 μ m. Il substrato 10 viene quindi sottoposto ad una fase di pulizia sul fronte e sul retro.

Quindi viene depositato sulla fetta 34 uno strato di isolamento 12, ad esempio di nitruro di silicio, preferibilmente a basso stress (LS-SiN, "Low Stress Silicon Nitride") di spessore compreso tra $0.2\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$, ad esempio $0.75\mu\text{m}$.

In seguito, figura 7, viene depositato un primo strato sacrificale 16, ad esempio di vetro drogato (PSG) o vetro non drogato (TEOS, USG), avente spessore compreso tra $0.8\mu\text{m}$ e $2\mu\text{m}$, preferibilmente $1.3\mu\text{m}$. Quindi, il primo strato sacrificale 16 viene definito, ad esempio mediante attacco secco, in modo da realizzare prime aperture 35 per una successiva formazione degli ancoraggi di piatto 14, seconde aperture 36 per una successiva formazione degli ancoraggi di membrana 11 e primi elementi di stampo 37, aventi la funzione di stampo per la formazione dei secondi elementi di antiadesione 4, come meglio descritto nel seguito.

In seguito, figura 8, viene depositato sulla fetta 34 uno strato di membrana 38, di tipo conduttivo, ad esempio polisilicio drogato di tipo N, in modo da riempire le seconde aperture 36 ed i primi elementi di stampo 37 e formare sulla fetta 34 uno strato avente spessore compreso tra $0.3\mu\text{m}$ e $1.5\mu\text{m}$, preferibilmente $0.7\mu\text{m}$. In questo modo vengono formati gli ancoraggi di membrana 11 e i secondi elementi di antiadesione 4. Gli ancoraggi di membrana 11 comprendono porzioni verticali formate all'interno delle

seconde aperture 36, in contatto diretto con lo strato di isolamento 12, ed una porzione del primo strato sacrificale 12 compresa tra le porzioni verticali degli ancoraggi di membrana 11; i secondi elementi di antiadesione 4 si estendono invece come protuberanze e hanno una forma ed uno spessore definiti dalla forma e dalla profondità dei primi elementi di stampo 37.

In seguito, mediante fasi successive di litografia e attacco, ad esempio un attacco secco, lo strato di membrana 38 viene selettivamente rimosso ad eccezione della zona in cui si vuole formare la membrana 2. In particolare, durante questa fase di attacco dello strato di membrana 38, vengono anche definite le trincee 20.

Quindi, figura 9, viene depositato sulla fetta 34 il secondo strato sacrificale 17, ad esempio USG ("Undoped-Silicon-Glass") con spessore di circa $0.6\mu\text{m}$. Il secondo strato sacrificale 17 viene definito in modo da formare una pluralità di avvallamenti o aperture aventi la funzione di consentire, durante la fase successiva di deposizione del terzo strato sacrificale 18, la formazione di secondi elementi di stampo 39 per realizzare i primi elementi di antiadesione 6. Infatti, nelle zone corrispondenti alla pluralità di avvallamenti o aperture formate nel secondo strato sacrificale 17, il terzo strato sacrificale 18 presenta una forma di superficie che segue almeno

parzialmente la forma del secondo strato sacrificale 17 sottostante, formando appunto i secondi elementi di stampo 39.

In questa fase viene formata una terza apertura (non mostrata) nel secondo e terzo strato sacrificale 17, 18 fino a raggiungere lo strato di membrana 38, per la successiva realizzazione del plug 23 conduttivo. Vengono quindi formate quinte aperture 41 nel secondo e terzo strato sacrificale 17, 18 lateralmente allo strato di membrana 38, fino a raggiungere lo strato di isolamento 12. Le quinte aperture 41 hanno la funzione di consentire la formazione dei pilastri 15 degli ancoraggi di piatto 14.

Quindi, figura 10, un primo strato di piatto rigido 43 viene formato sulla fetta 34, per riempire le quinte aperture 41 e formare uno strato conduttivo al di sopra del terzo strato sacrificale 18. Il primo strato di piatto rigido 43 può essere ad esempio costituito da polisilicio drogato di tipo N, di spessore compreso tra 0.5 μ m e 2 μ m, preferibilmente di 0.9 μ m. Il primo strato di piatto rigido 43 viene selettivamente rimosso per esporre i secondi elementi di stampo 39 formati nel secondo strato sacrificale 17 sottostante e per formare parte dei fori 8.

Un secondo strato di piatto rigido 45, figura 11, viene formato sulla fetta 34, in modo da riempire i secondi elementi di stampo 39 per formare i primi elementi di

antiadesione 6. Il secondo strato di piatto rigido 45 è uno strato di materiale isolante, ad esempio nitruro di silicio, con spessore compreso tra $0.7\mu\text{m}$ e $2\mu\text{m}$, preferibilmente $1.2\mu\text{m}$. Una successiva fase di attacco permette di rimuovere selettivamente il secondo strato di piatto rigido 45 per completare la formazione dei fori 8 e per realizzare aperture in cui successivamente formare la piazzola di contatto 25' in contatto elettrico con il plug 23 attraverso la porzione di connessione di plug 24 (questi ultimi non mostrati in figura 11).

La figura 12 mostra un successiva fase di lavorazione del retro della fetta 34. In particolare, mediante fasi successive di attacco e pulizia meccanica ("grinding", di tipo noto), il retro della fetta 34 viene pulito e assottigliato, fino a raggiungere uno spessore compreso tra $400\mu\text{m}$ e $600\mu\text{m}$, ad esempio $500\mu\text{m}$. Per proteggere il fronte della fetta 34 durante queste fasi di pulizia e assottigliamento, può essere vantaggioso depositare uno strato di protezione sul fronte della fetta 34, che deve poi essere rimosso al termine delle fasi di fabbricazione (non mostrato).

Quindi, mediante fasi successive di litografia e attacco, viene formata la cavità 5. Più in dettaglio, la cavità 5 viene formata utilizzando un doppio attacco secco. Innanzitutto, figura 12, viene cresciuto sul retro 10a

della fetta 34 uno strato di ossido TEOS e quindi definito per formare prime regioni di maschera 50. Si procede quindi con un primo attacco secco. L'area del substrato 10 sottoposta ad attacco è definita dalle prime regioni di maschera (i.e., l'area del substrato 10 non coperta dalle prime regioni di maschera), mentre la profondità della porzione di substrato 10 attaccata è pari alla profondità che si desidera ottenere per la prima camera 5a. Quindi, figura 13, le prime regioni di maschera 50 vengono parzialmente rimosse realizzando seconde regioni di maschera 51 che definiscono l'area della seconda camera 5b, di ampiezza maggiore rispetto all'area della prima camera 5a, ed un ulteriore attacco secco sul retro della fetta 34 permette di rimuovere il substrato 10 dove non protetto dalle seconde regioni di maschera 51, fino ad esporre parzialmente lo strato di isolamento 12. Le seconde porzioni di maschera 51 vengono quindi rimosse. Si formano in questo modo contemporaneamente la prima camera 5a e la seconda camera 5b. Rimuovendo infine la porzione di strato di isolamento 12 esposta, viene parzialmente esposto il primo strato sacrificale 16. In questo modo si forma una cavità 5 la cui ampiezza massima (data dall'ampiezza della seconda camera 5b) è indipendente dalla disposizione degli ancoraggi di membrana 11 della membrana 2.

Infine, figura 14, un attacco umido, ad esempio con

acido idrofluoridrico (HF), permette di rimuovere il primo, il secondo ed il terzo strato sacrificale 16, 17 e 18 al di sotto dello strato di membrana 38, del primo strato di piatto rigido 43 e del secondo strato di piatto rigido 45 dove non protetti, realizzando in questo modo la membrana 2 e il piatto rigido 3 sospesi al di sopra del substrato 10 e della cavità 5.

Questo attacco è diviso in due parti separate, la prima parte dell'attacco è unicamente finalizzata alla liberazione del dispositivo dallo strato sacrificale 16, mentre il fronte viene protetto da uno strato protettivo resistente all'acido, ad esempio resist. Effettuata la liberazione completa o parziale del sacrificale 16, viene effettuata la rimozione della copertura in attacco secco e si procede alla liberazione degli ossidi sacrificali 17 e 18. Questo procedimento consente un controllo più affidabile sullo spessore residuo dei dielettrici 12 e 45 (determinanti per la funzionalità del dispositivo) durante la liberazione.

Si realizza in questo modo un microfono MEMS analogo al microfono MEMS 1 di figura 2.

Risulta chiaro che le fasi di fabbricazione descritte possono essere utilizzate per fabbricare una pluralità di microfoni MEMS su una stessa fetta 34.

La figura 15 mostra un dispositivo elettronico 100 che

utilizza uno o più microfoni MEMS 1 (un solo microfono MEMS 1 mostrato in figura).

Il dispositivo elettronico 100 comprende, oltre al microfono MEMS 1, un microprocessore 101, un blocco di memoria 102, collegato al microprocessore 101, ed un'interfaccia di ingresso/uscita 103, ad esempio una tastiera ed un video, anch'essa collegata con il microprocessore 101. Il microfono MEMS 1 comunica con un microprocessore 101 tramite un blocco di trattamento di segnali 102, ad esempio un amplificatore. Inoltre, può essere presente un altoparlante 106, per generare un suono su un'uscita audio (non mostrata) del dispositivo elettronico 100.

Il dispositivo elettronico 100 è preferibilmente un dispositivo di comunicazione mobile, come ad esempio un cellulare, un PDA, un notebook, ma anche un registratore vocale, un lettore di file audio con capacità di registrazione vocale, ecc. In alternativa, il dispositivo elettronico 100 può essere un idrofono, in grado di lavorare sott'acqua.

Da un esame delle caratteristiche del trasduttore acustico MEMS realizzato secondo la presente invenzione sono evidenti i vantaggi che essa consente di ottenere.

In particolare, formando degli intagli o delle trincee nella membrana 2 aventi la funzione di molle configurate

per supportare contrazioni o espansioni radiali, la frequenza di risonanza della membrana 2 e quindi la sensitività del dispositivo che la utilizza (ad esempio un microfono) sono sostanzialmente indipendenti dagli stress residui nello strato che forma la membrana 2 stessa e di conseguenza scarsamente dipendenti sia dagli spread di processo di fabbricazione che dagli stress termomeccanici indotti dal package (stabilità in temperatura). Inoltre, grazie a tali molle, poiché la membrana 2 tende a rilasciare gli stress, anche la sua rigidità è scarsamente dipendente dall'intensità di tali stress residui per un ampio intervallo di valori (compresi tra +20MPa e +80MPa), che può essere scelto variando i parametri geometrici L, W, P (come descritto con riferimento alla figura 1) in modo relativo ai valori di diametro e spessore della membrana.

Inoltre, formando gli intagli o le trincee si riescono a ridurre gli effetti delle variabilità di processo intrinseche nei processi di produzione di massa.

Risulta infine chiaro che al microfono MEMS 1 qui descritto ed illustrato possono essere apportate modifiche e varianti senza per questo uscire dall'ambito protettivo della presente invenzione, come definito nelle rivendicazioni allegate.

Ad esempio, come mostrato schematicamente nelle figure 16 e 17, la membrana 2 ed il piatto rigido 3 possono avere

una forma diversa dalla forma circolare, ad esempio possono avere una forma quadrangolare (figura 16) o generalmente poligonale (figura 17) a seconda delle necessità.

Inoltre, come mostrato nelle figure 18a-18c, le trincee 20 possono avere una forma diversa dalla forma ad arco, ad esempio rettangolare o in generale poligonale (figura 18a), ondulata o poligonale con angoli smussati (figura 18b), a lunetta (figura 18c).

Infine, risulta chiaro che il piatto fisso 3 e la membrana 2 possono essere realizzati in qualunque materiale conduttivo diverso dal polisilicio drogato, ad esempio oro o alluminio.

RIVENDICAZIONI

1. Trasduttore acustico MEMS, comprendente:

un substrato (10) dotato di una cavità (5);

una membrana (2) sospesa al di sopra di detta cavità e fissata perifericamente a detto substrato, con possibilità di oscillazione, attraverso almeno un ancoraggio di membrana (11),

caratterizzato dal fatto che detta membrana comprende almeno una molla (20) disposta in prossimità di e affacciata a detto ancoraggio di membrana ed atta ad agire in trazione o compressione lungo una direzione giacente in uno stesso piano di detta membrana.

2. Trasduttore acustico MEMS secondo la rivendicazione 1, in cui detta molla (20) è un intaglio formato in detta membrana.

3. Trasduttore acustico MEMS secondo la rivendicazione 2, in cui ciascun intaglio ha un proprio spessore pari allo spessore della membrana ed una forma allungata scelta nel gruppo tra: rettangolare, ad arco, ondulata, poligonale, poligonale con angoli smussati, a lunetta.

4. Trasduttore acustico MEMS secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui detta membrana comprende almeno una seconda molla (20) disposta in prossimità di ed affacciata ad un secondo ancoraggio di membrana (11).

5. Trasduttore acustico MEMS secondo la rivendicazione

4, in cui ciascuna molla è costituita da un intaglio di forma allungata avente una prima coppia di lati di delimitazione laterale (L) aventi lunghezza compresa tra $80\mu\text{m}$ e $140\mu\text{m}$, preferibilmente pari a circa $100\mu\text{m}$, ed una seconda coppia di lati di delimitazione laterale (P) aventi lunghezza compresa tra $2\mu\text{m}$ e $6\mu\text{m}$, preferibilmente pari a circa $4\mu\text{m}$, detto intaglio essendo disposto ad una distanza (W) dal rispettivo ancoraggio di membrana (11) compresa tra $10\mu\text{m}$ e $40\mu\text{m}$, preferibilmente pari a circa $25\mu\text{m}$.

6. Trasduttore acustico MEMS secondo una delle rivendicazioni precedenti, comprendente un elettrodo (3) disposto a distanza e affacciato alla membrana, detta membrana (2) e detto elettrodo essendo di materiale conduttivo, preferibilmente polisilicio drogato, e formando un condensatore.

7. Trasduttore acustico MEMS secondo la rivendicazione 6, in cui detto elettrodo (3) comprende una porzione conduttiva di elettrodo (3a), direttamente affacciata a detta membrana, ed una porzione di elettrodo isolante (3b), disposta al di sopra di detta porzione di elettrodo conduttiva e comprendente primi elementi di antiadesione (6), estendentisi attraverso detta porzione conduttiva di elettrodo e sporgenti oltre detta porzione conduttiva di elettrodo verso detta membrana.

8. Trasduttore acustico MEMS secondo una delle

rivendicazioni precedenti, in cui detta membrana comprende secondi elementi di antiadesione (4), solidali a detta membrana ed estendentisi verso detto substrato.

9. Trasduttore acustico MEMS secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui detta membrana (2) presenta un'area e detta cavità (5) comprende un prima camera (5a) ed una seconda camera (5b), la prima camera essendo affacciata alla membrana ed avendo una propria area inferiore all'area della membrana (2), e la seconda camera (5b) essendo disposta in prosecuzione della prima camera ed avendo una propria area maggiore dell'area di detta prima camera.

10. Trasduttore acustico MEMS secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 6-9, in cui detto elettrodo (3) comprende un proprio ancoraggio di elettrodo (14) ancorato al substrato, detto ancoraggio di elettrodo essendo disposto in prossimità di detto ancoraggio di membrana (11).

11. Dispositivo elettronico, comprendente un trasduttore acustico MEMS secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, detto dispositivo elettronico essendo scelto nel gruppo comprendente: un cellulare, un PDA, un notebook, un registratore vocale, un lettore audio con funzionalità di registratore vocale, una consolle per videogiochi, un idrofono.

12. Processo di fabbricazione di un trasduttore acustico MEMS, comprendente le fasi di:

disporre un substrato (10);

formare una membrana (2) sospesa al di sopra di e fissata perifericamente a detto substrato attraverso almeno un ancoraggio di membrana (11), con possibilità di oscillazione; e

formare una cavità (5) nel substrato al di sotto della membrana,

caratterizzato dalla fase di formare almeno una molla (20) disposta in prossimità di e affacciata a detto ancoraggio di membrana, detta molla essendo atta ad agire in trazione o compressione lungo una direzione giacente in uno stesso piano di detta membrana.

13. Processo secondo la rivendicazione 12, in cui la fase di formare la membrana (32) comprende formare almeno un intaglio in detta membrana in modo da definire detta molla (20), in corrispondenza di ed affacciata a detto ancoraggio di membrana (11).

14. Processo secondo la rivendicazione 12 o 13, comprendente inoltre la fase di formare un elettrodo (3) a distanza e affacciato alla membrana, detta membrana (2) e detto elettrodo essendo di materiale conduttivo, preferibilmente polisilicio drogato.

15. Processo secondo la rivendicazione 14, in cui le

fasi di formare detta membrana (2) e detto elettrodo (3) comprendono le fasi di:

formare un primo strato sacrificale (16) al di sopra del substrato;

formare uno strato di membrana (38) al di sopra di detto primo strato sacrificale (16);

definire detto strato di membrana (38);

formare un secondo strato sacrificale (18) al di sopra di detto strato di membrana;

depositare un primo strato di elettrodo (43) al di sopra di detto secondo strato sacrificale (18) e definire detto primo strato di elettrodo in modo da realizzare un elettrodo separato da detta membrana attraverso detto secondo strato sacrificale;

rimuovere detto primo strato sacrificale, in modo da sospendere detta membrana al di sopra del substrato;

rimuovere parzialmente detto secondo strato sacrificale in modo da sospendere l'elettrodo al di sopra della membrana.

16. Processo secondo la rivendicazione 15, in cui la fase di formare detto secondo strato sacrificale porta alla formazione di aperture (39) in detto secondo strato sacrificale e la fase di definire detto primo strato di elettrodo comprende rimuovere detto primo strato di elettrodo in corrispondenza di dette aperture (39), detto

processo comprendendo inoltre la fase di depositare un secondo strato di elettrodo (45) al di sopra di detto primo strato di elettrodo (43) ed all'interno di dette aperture (39), in modo da formare protuberanze (6) estendentisi attraverso detto primo strato di elettrodo e sporgenti oltre detto primo strato di elettrodo verso detta membrana.

17. Processo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 12-16, in cui la fase di formare una cavità comprendente scavare dal retro detto substrato per definire una cavità iniziale utilizzando una prima maschera avente una prima finestra presentante una prima area, e scavare ulteriormente dal retro detto substrato utilizzando una seconda maschera avente una seconda finestra presentante una seconda area maggiore della prima area, formando contemporaneamente una prima camera (5a) avente la prima area e affacciata a detta membrana (2), ed una seconda camera (5b) comunicante con detta prima camera (5a) ed avente la seconda area.

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

Elena CERBARO

Elena CERBARO
(Iscrizione Albo nr. 426/BM)

CLAIMS

1. A MEMS acoustic transducer, comprising:
a substrate (10) having a cavity (5); and
a membrane (2) suspended above said cavity and fixed peripherally to said substrate, with the possibility of oscillation, through at least a membrane anchorage (11),
characterized in that said membrane comprises at least a spring (20) arranged in the proximity of, and facing, said membrane anchorage and configured to act in tension or compression in a direction lying in a same plane as said membrane.

2. The MEMS acoustic transducer according to claim 1, wherein said spring (20) is a cut formed in said membrane.

3. The MEMS acoustic transducer according to claim 2, wherein each cut has a thickness of its own equal to the thickness of the membrane and an elongated shape chosen from amongst: rectangular, arched, undulated, polygonal, polygonal with rounded corners, crescent-shaped.

4. The MEMS acoustic transducer according to any one of the preceding claims, wherein said membrane comprises at least a second spring (20) arranged in the proximity of, and facing, a second membrane anchorage (11).

5. The MEMS acoustic transducer according to claim 4, wherein each spring is constituted by a cut of an elongated

shape having a first pair of lateral-delimitation sides (L) having a length comprised between 80 μm and 140 μm , preferably equal to approximately 100 μm , and a second pair of lateral-delimitation sides (P) having a length comprised between 2 μm and 6 μm , preferably equal to approximately 4 μm , said cut being arranged at a distance (W) from the respective membrane anchorage (11) comprised between 10 μm and 40 μm , preferably equal to approximately 25 μm .

6. The MEMS acoustic transducer according to any one of the preceding claims, comprising an electrode (3) arranged at a distance from and facing the membrane, said membrane (2) and said electrode being made of conductive material, preferably doped polysilicon, and forming a capacitor.

7. The MEMS acoustic transducer according to claim 6, wherein said electrode (3) comprises a conductive electrode portion (3a), directly facing said membrane, and an insulating electrode portion (3b), arranged above said conductive electrode portion and comprising first anti-stiction elements (6), extending through said conductive electrode portion and projecting beyond said conductive electrode portion towards said membrane.

8. The MEMS acoustic transducer according to any one of the preceding claims, wherein said membrane comprises

second anti-stiction elements (4), fixed to said membrane and extending towards said substrate.

9. The MEMS acoustic transducer according to any one of the preceding claims, wherein said membrane (2) has an area, and said cavity (5) comprises a first chamber (5a) and a second chamber (5b), the first chamber facing the membrane and having an area of its own smaller than the area of the membrane (2), and the second chamber (5b) being arranged as an extension of the first chamber and having an area of its own larger than the area of said first chamber.

10. The MEMS acoustic transducer according to any one of claims 6-9, wherein said electrode (3) comprises an electrode anchorage (14) of its own anchored to the substrate, said electrode anchorage being arranged in the proximity of said membrane anchorage (11).

11. An electronic device, comprising a MEMS acoustic transducer according to any one of the preceding claims, said electronic device being chosen in the group comprising: a cellphone, a PDA, a notebook, a voice recorder, an audio player with functionalities of voice recorder, a console for videogames, a hydrophone.

12. A process for manufacturing a MEMS acoustic transducer, comprising the steps of:

providing a substrate (10);

forming a membrane (2) suspended above and fixed peripherally to said substrate through at least one membrane anchorage (11), with the possibility of oscillation; and

forming a cavity (5) in the substrate underneath the membrane,

characterized by the step of forming at least one spring (20) arranged in the proximity of and facing said membrane anchorage, said spring being configured to act in tension or compression in a direction lying in a same plane as said membrane.

13. The process according to claim 12, wherein the step of forming the membrane (32) comprises forming at least one cut in said membrane so as to define said spring (20), in a position corresponding to and facing said membrane anchorage (11).

14. The process according to claim 12 or claim 13, further comprising the step of forming an electrode (3) at a distance from and facing the membrane, said membrane (2) and said electrode being made of conductive material, preferably doped polysilicon.

15. The process according to claim 14, wherein the steps of forming said membrane (2) and said electrode (3) comprise the steps of:

forming a first sacrificial layer (16) on the substrate;

forming a membrane layer (38) on said first sacrificial layer (16);

defining said membrane layer (38);

forming a second sacrificial layer (18) on said membrane layer;

depositing a first electrode layer (43) on said second sacrificial layer (18) and defining said first electrode layer so as to form an electrode separated from said membrane through said second sacrificial layer;

removing said first sacrificial layer, so as to suspend said membrane over the substrate; and

partially removing said second sacrificial layer so as to suspend the electrode above the membrane.

16. The process according to claim 15, wherein the step of forming said second sacrificial layer leads to formation of openings (39) in said second sacrificial layer, and the step of defining said first electrode layer comprises removing said first electrode layer in a position corresponding to said openings (39), said process further comprising the step of depositing a second electrode layer (45) on said first electrode layer (43) and within said openings (39), so as to form protuberances (6) extending

through said first electrode layer and projecting beyond said first electrode layer towards said membrane.

17. The process according to any one of claims 12-16, wherein the step of forming a cavity comprises etching from the back said substrate for defining an initial cavity using a first mask having a first window with a first area, and further etching from the back said substrate using a second mask having a second window with a second area larger than the first area, simultaneously forming a first chamber (5a) having the first area and facing said membrane (2), and a second chamber (5b) communicating with said first chamber (5a) and having the second area.

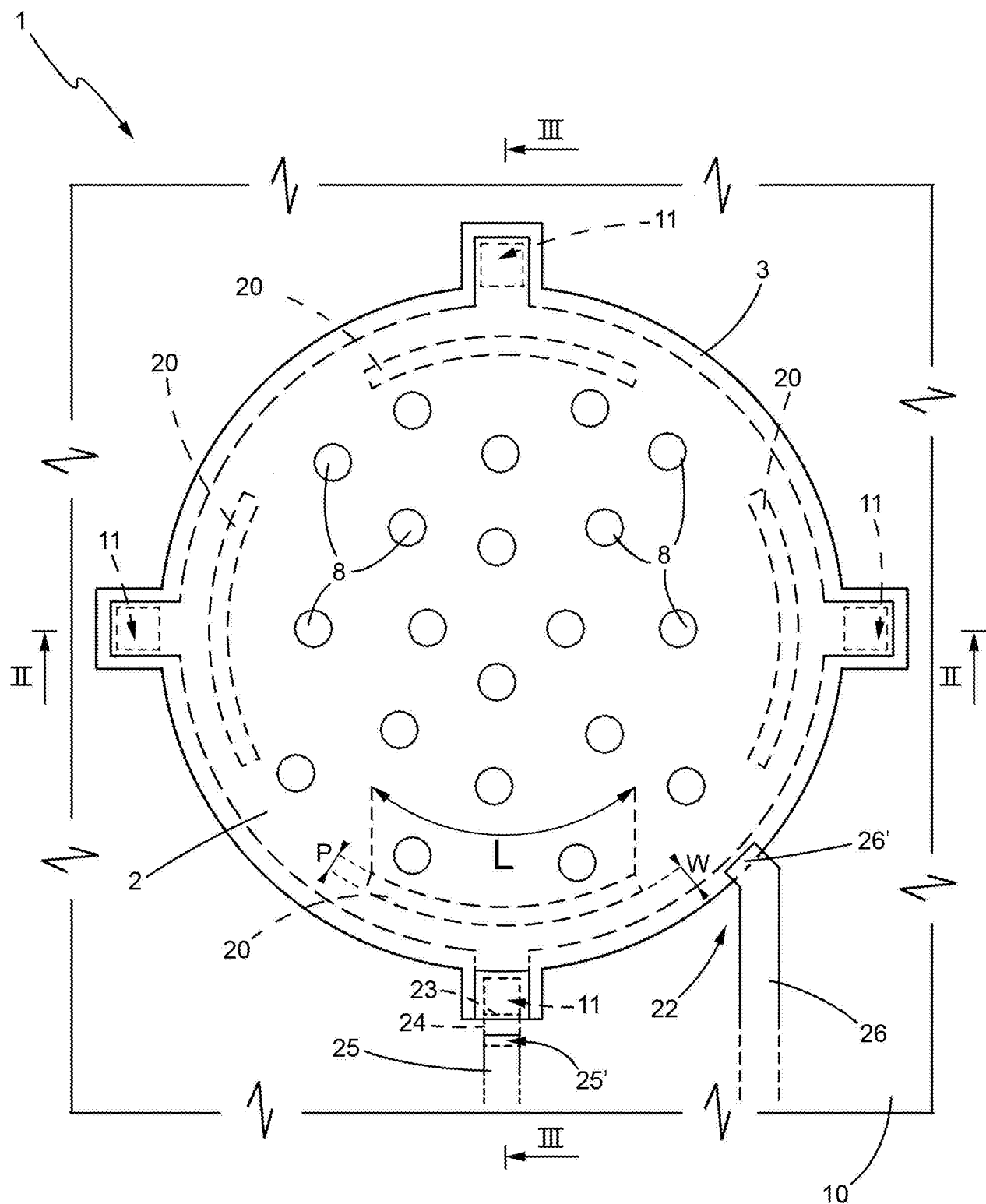


FIG. 1

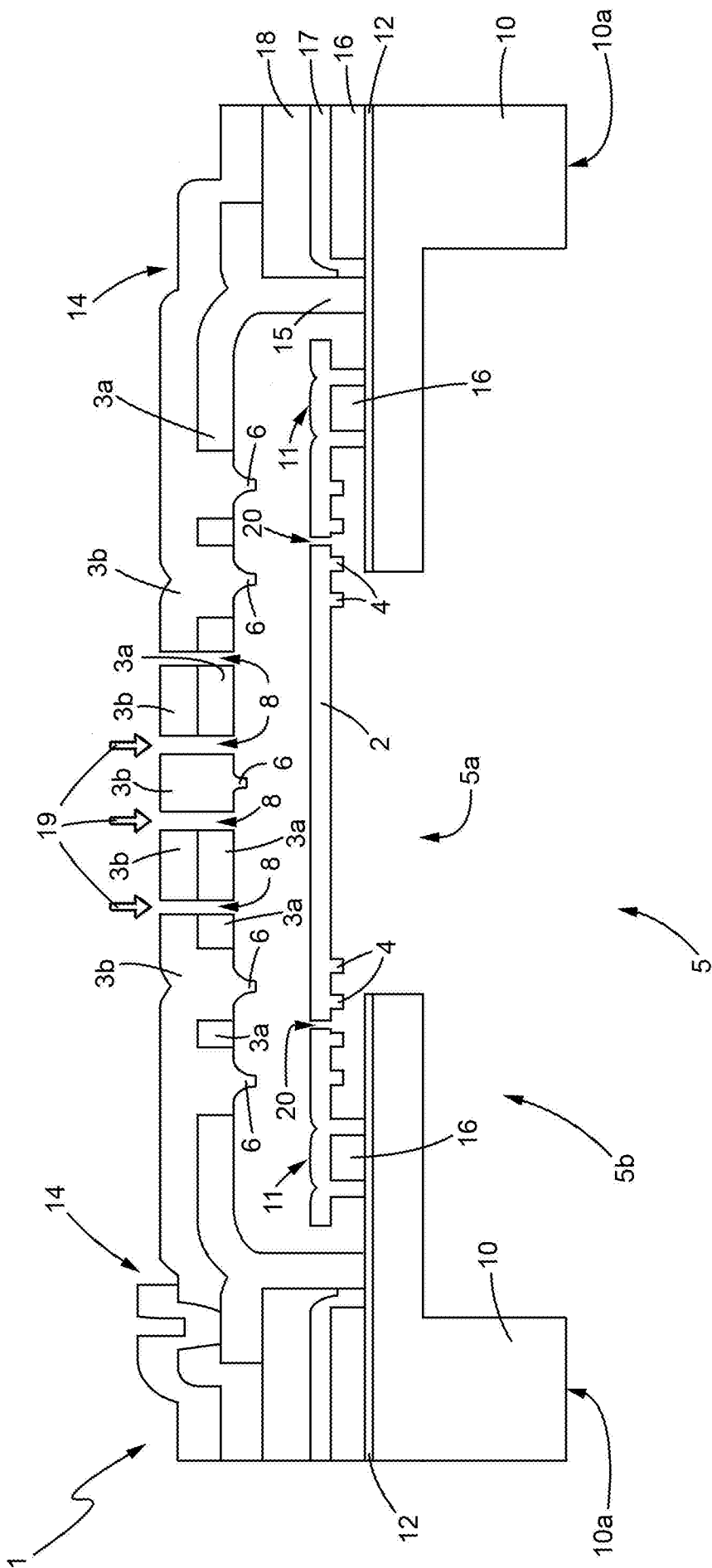
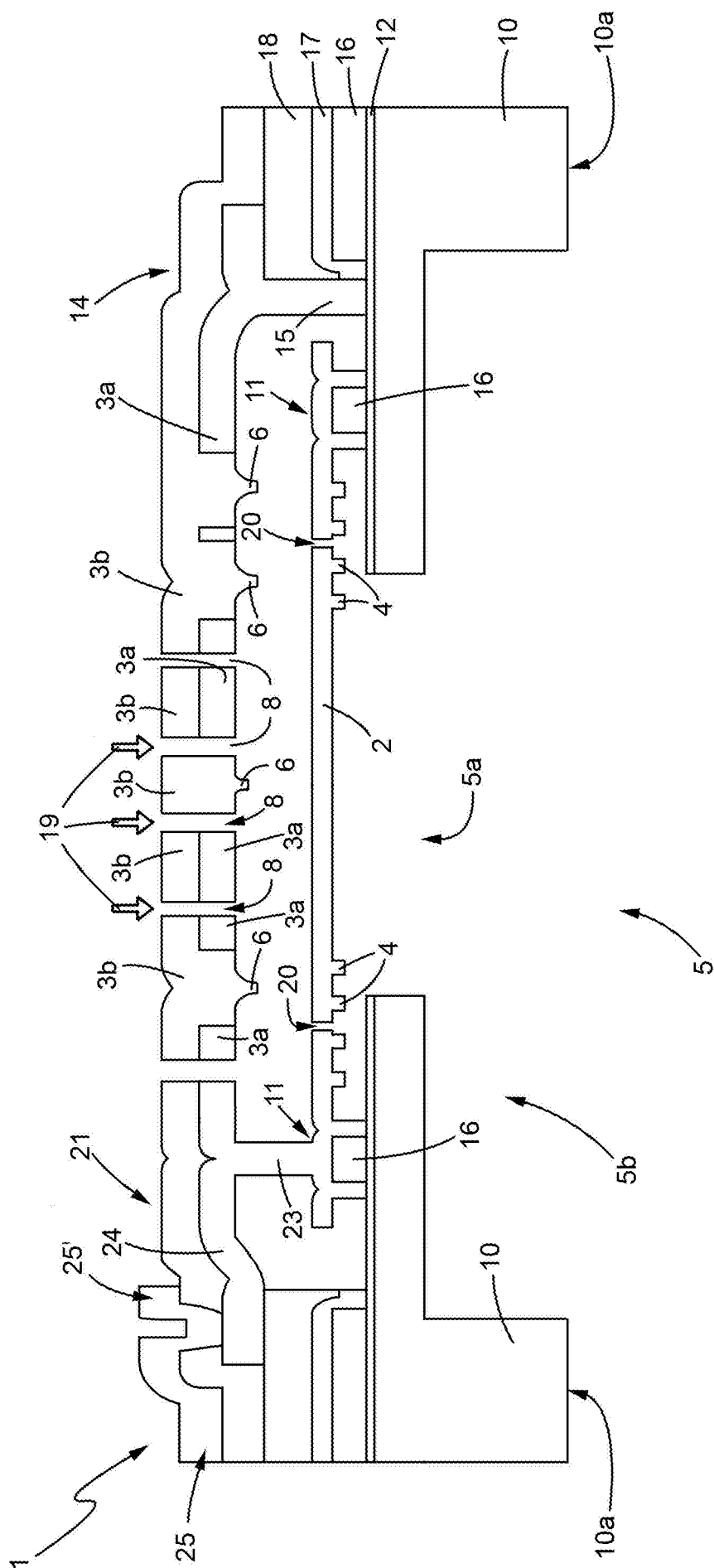


FIG. 2



3
G
F

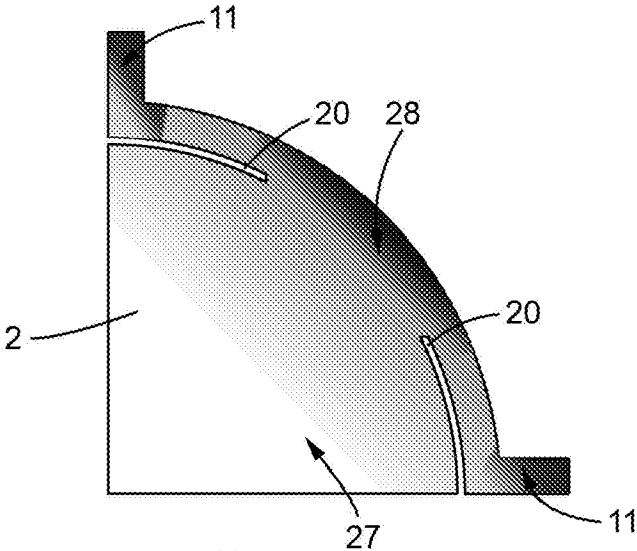


FIG. 4a

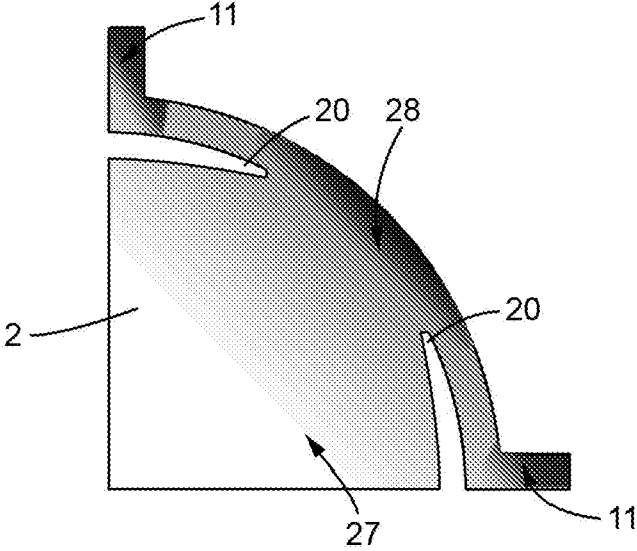


FIG. 4b

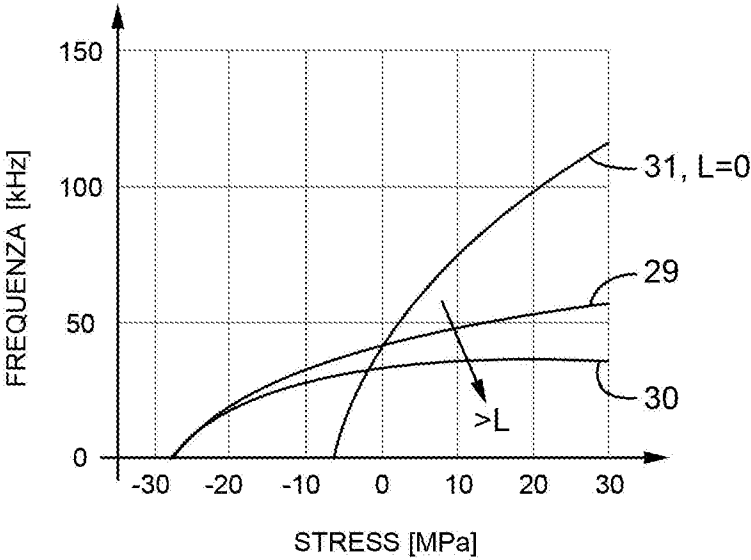


FIG. 5

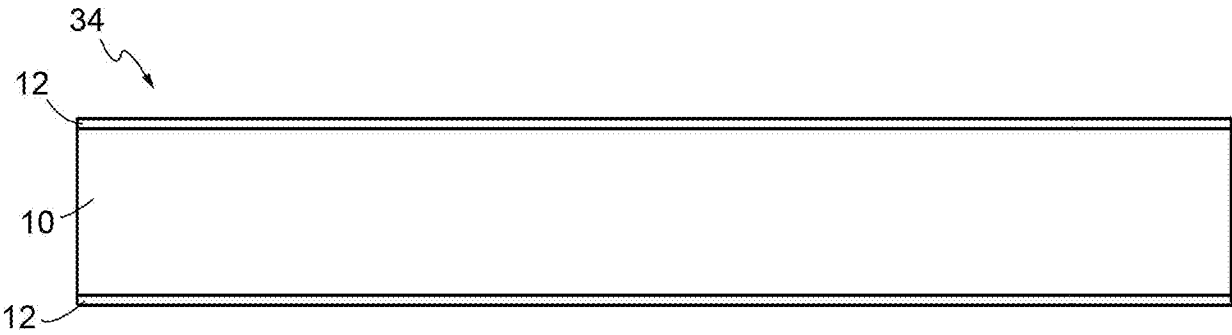


FIG. 6

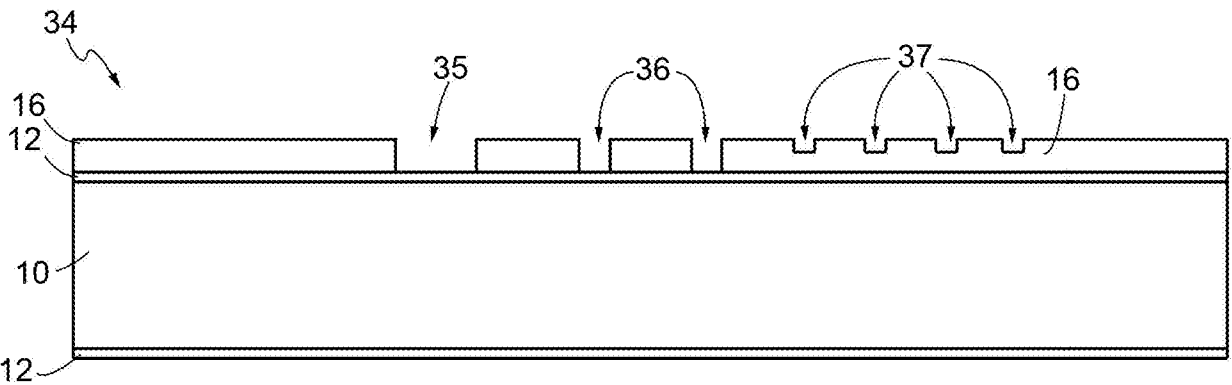


FIG. 7

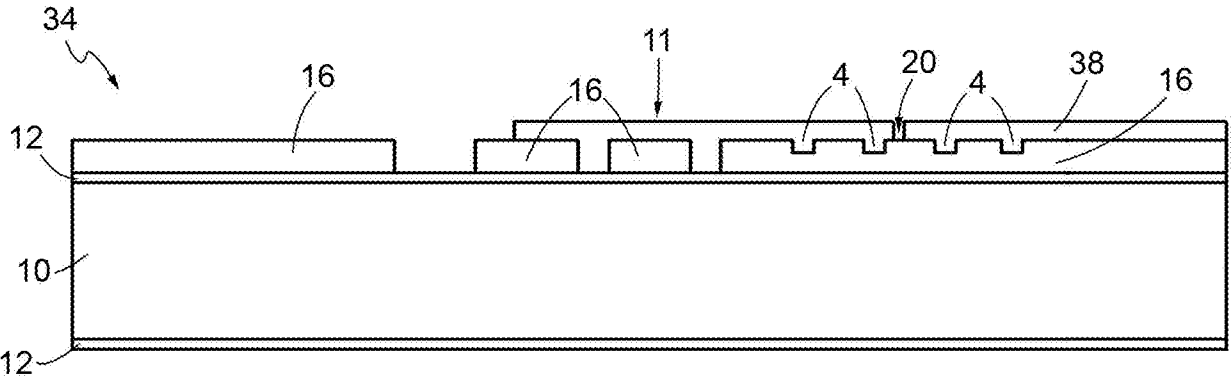


FIG. 8

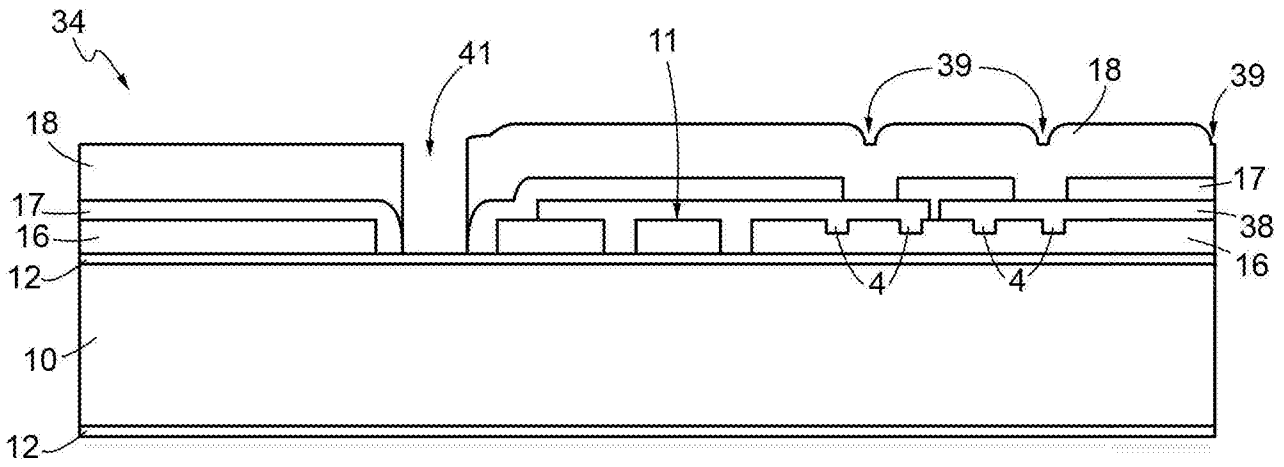


FIG. 9

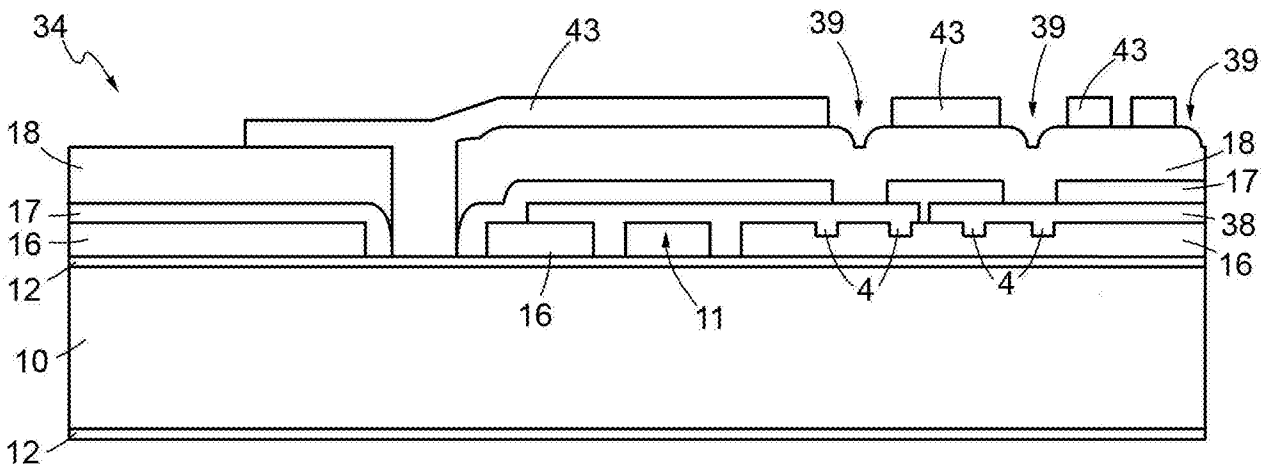


FIG. 10

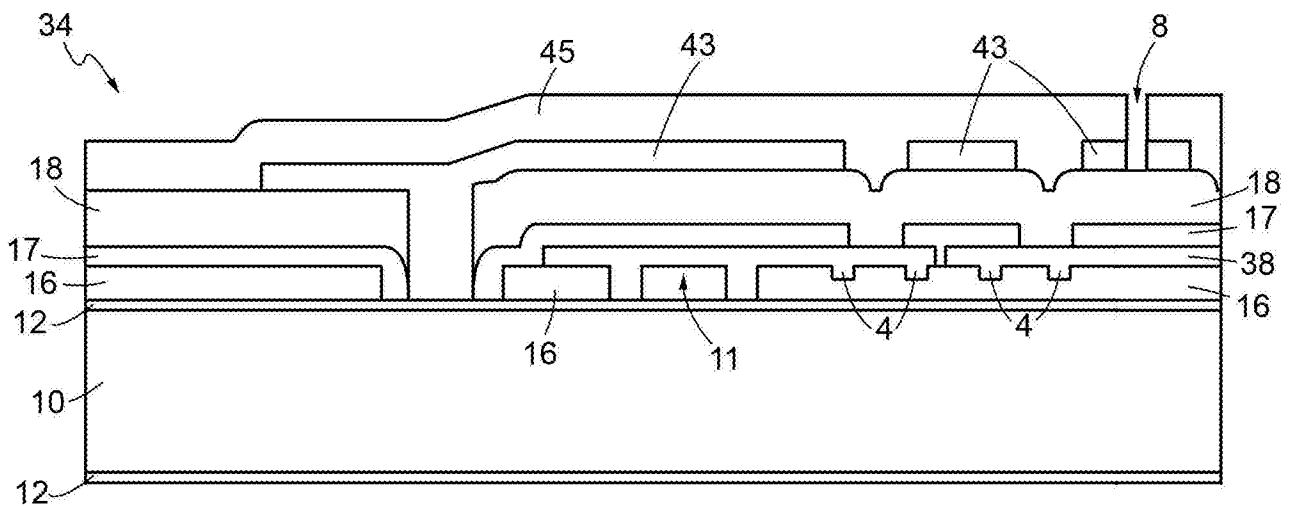


FIG. 11

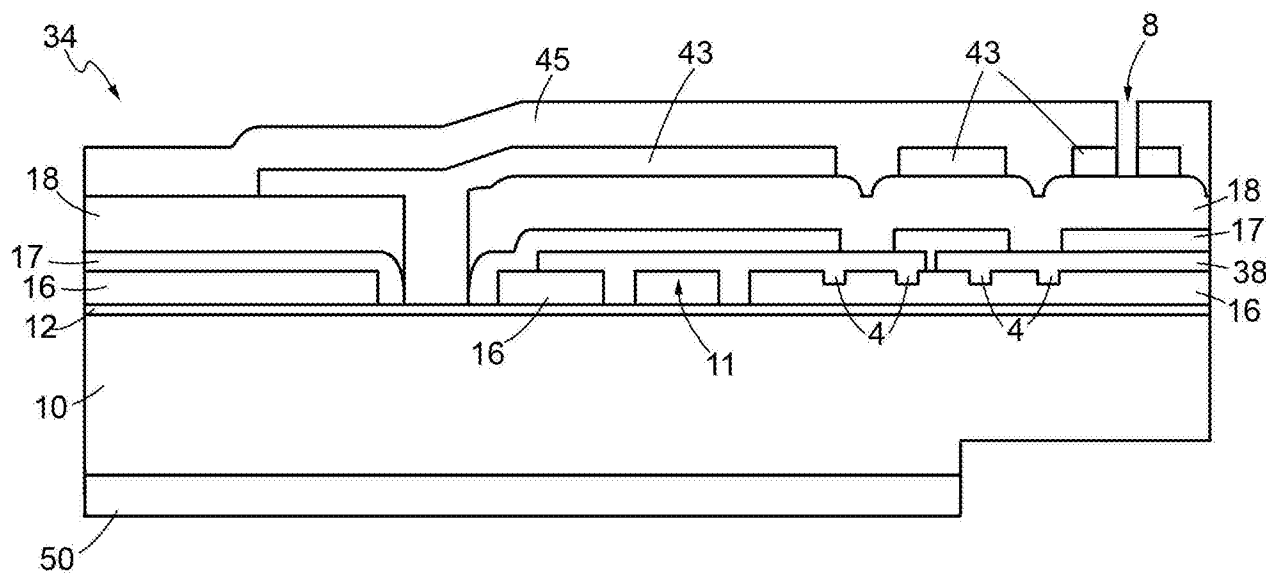


FIG. 12

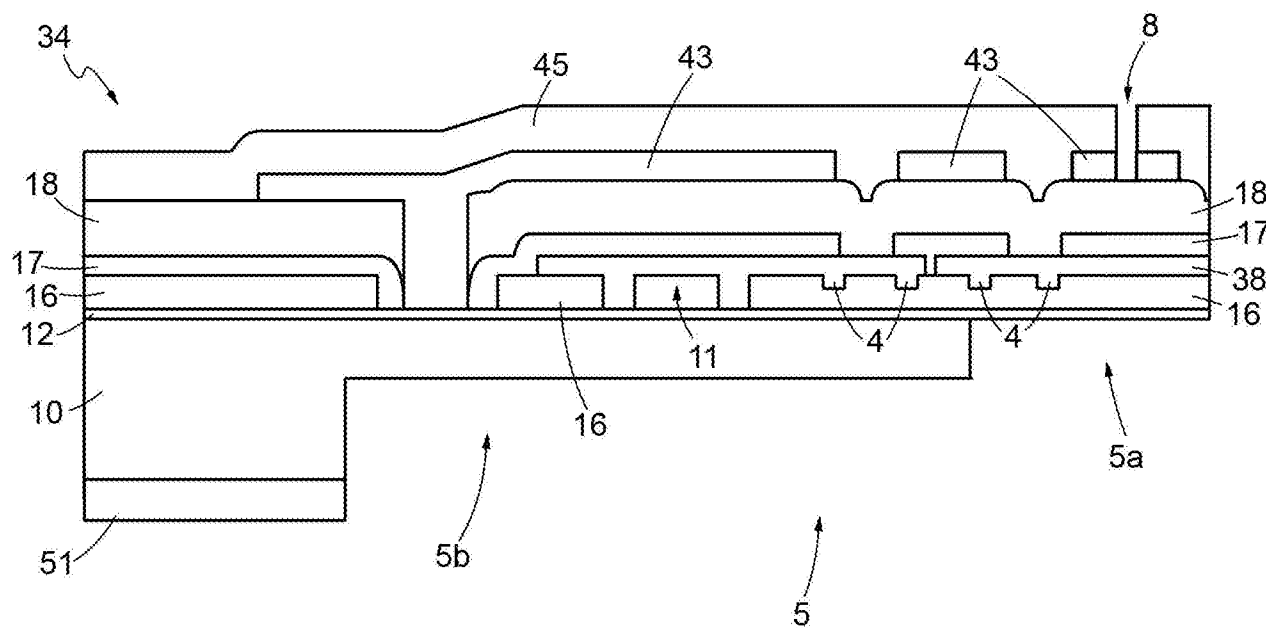


FIG. 13

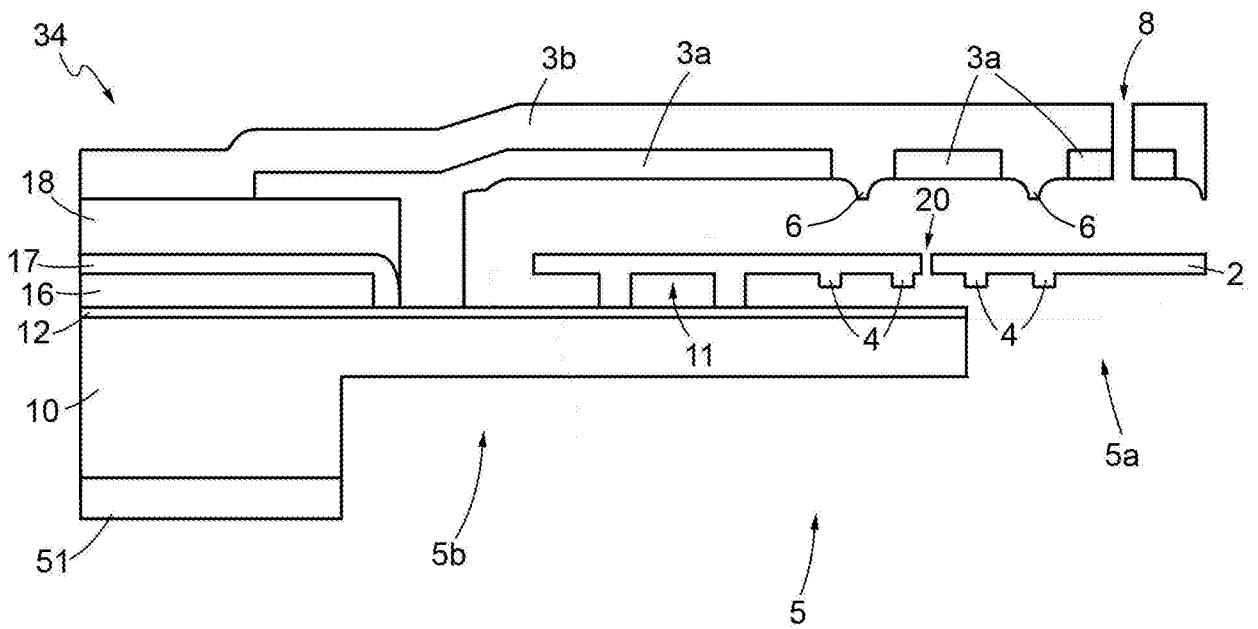


FIG. 14

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

Elena CERBARO
(Iscrizione Albo nr. 426/BM)

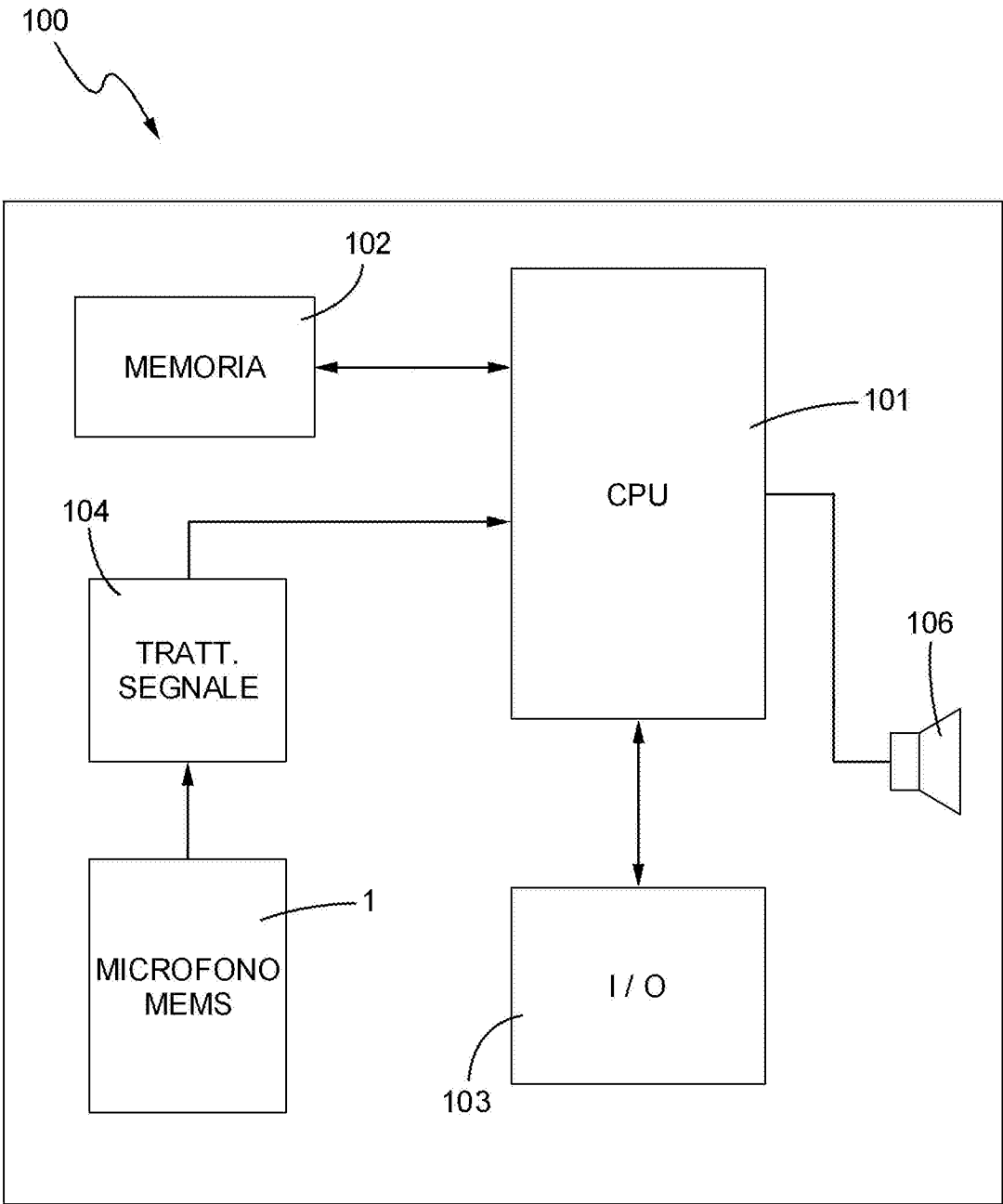


FIG. 15

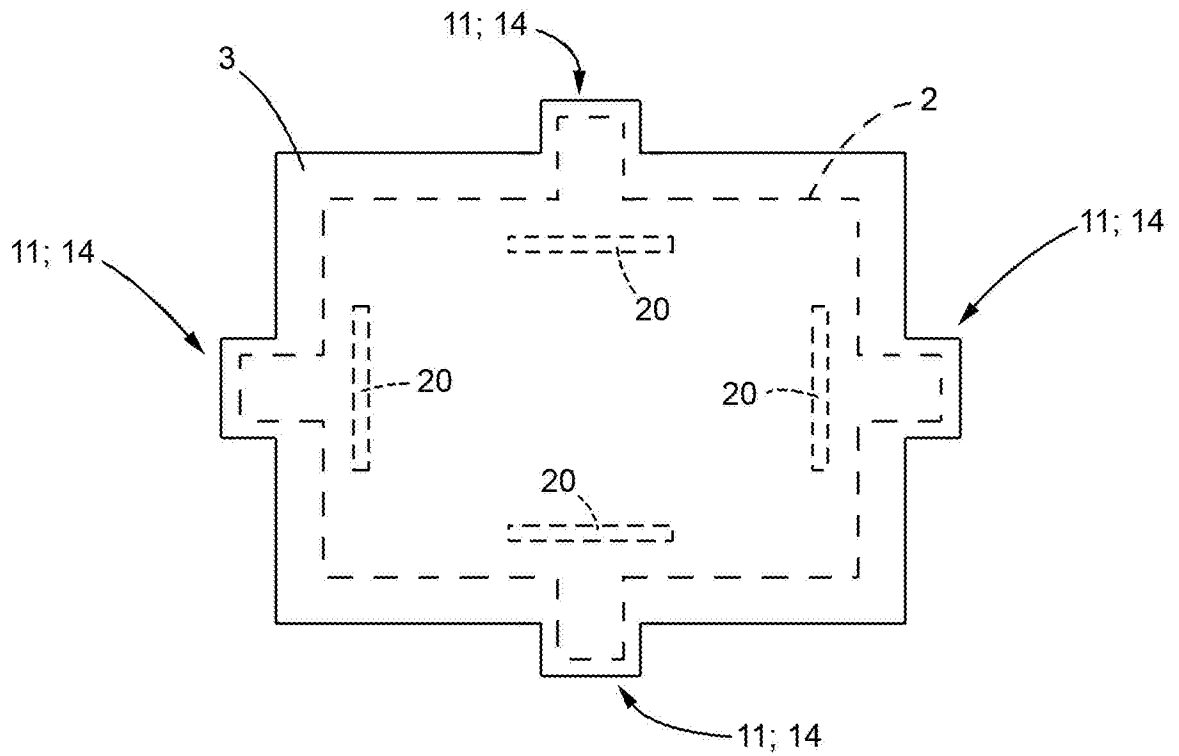


FIG. 16

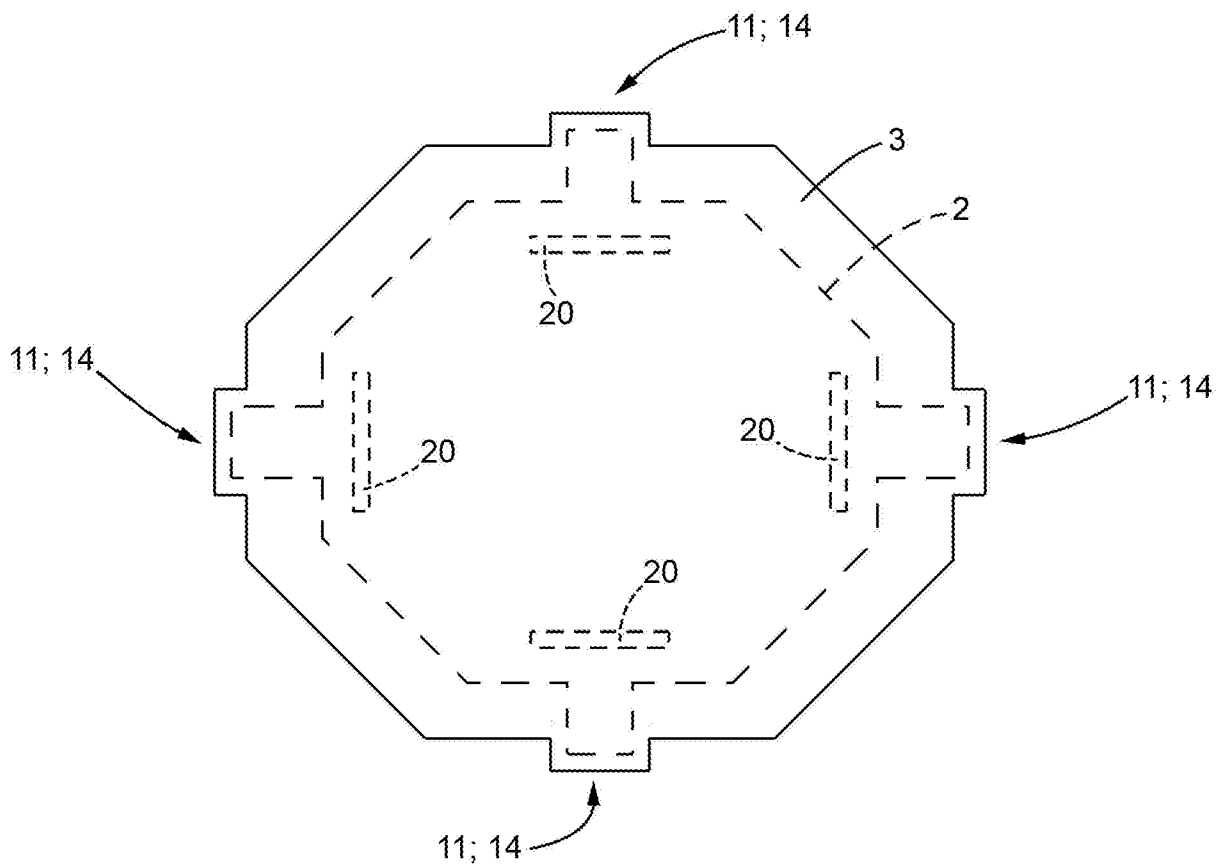


FIG. 17

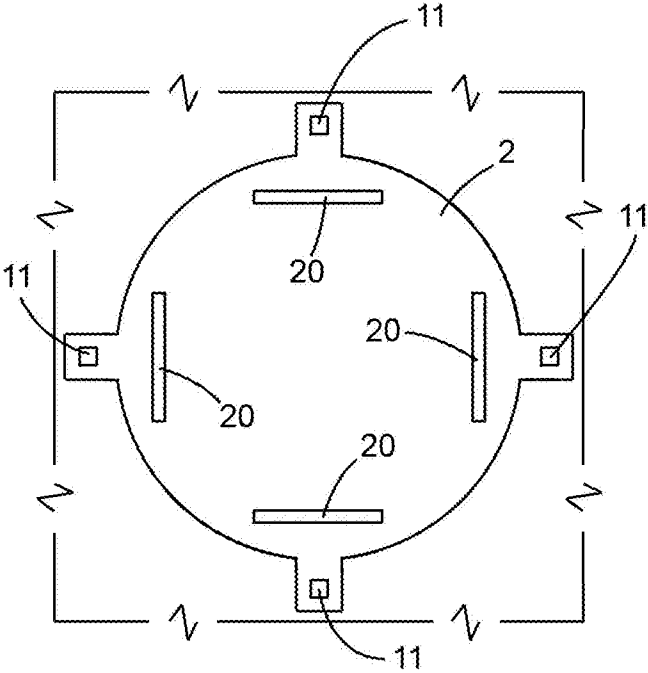


FIG. 18a

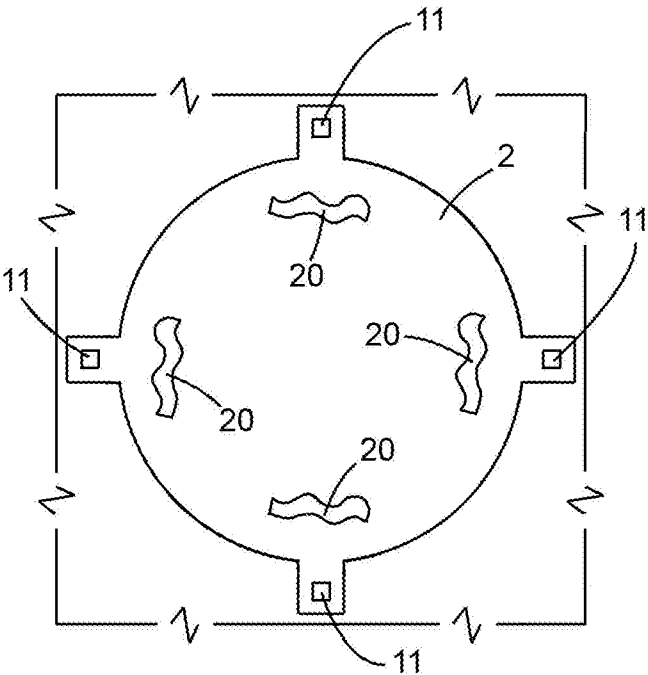


FIG. 18b

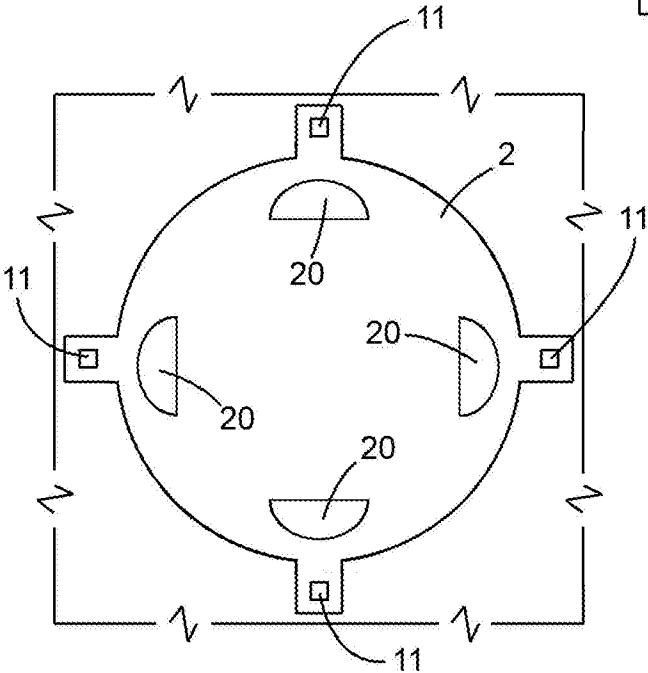


FIG. 18c