

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102021000022511
Data Deposito	30/08/2021
Data Pubblicazione	28/02/2023

Classifiche IPC

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
B	81	B	7	02

Titolo

PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE DI UN SISTEMA INTEGRATO INCLUDENTE UN
SENSORE DI PRESSIONE CAPACITIVO E UN SENSORE INERZIALE, E SISTEMA INTEGRATO

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE DI UN SISTEMA INTEGRATO
INCLUDENTE UN SENSORE DI PRESSIONE CAPACITIVO E UN
SENSORE INERZIALE, E SISTEMA INTEGRATO"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI 2

20864 AGRATE BRIANZA (MB)

Inventori: FERRARI Paolo, CORSO Lorenzo, VILLA Flavio
Francesco, NICOLI Silvia, LAMAGNA Luca

* * *

La presente invenzione è relativa ad un procedimento di fabbricazione di un sistema micro-elettro-meccanico (MEMS), e ad un sistema micro-elettro-meccanico includente un primo dispositivo MEMS ed un secondo dispositivo MEMS. In particolare, il primo dispositivo MEMS è un sensore di pressione capacitivo ed il secondo dispositivo MEMS è un sensore inerziale, o una combinazione di sensori inerziali, quali ad esempio un accelerometro e un giroscopio.

Il sensore di pressione capacitivo è dotato di una regione sospesa, o membrana, in grado di muoversi rispetto al resto della struttura. In particolare, tale membrana rappresenta un elettrodo variabile, affacciato

ad una porzione fissa costituente un elettrodo fisso e separato da questo mediante una cavità in parte o talmente sepolta. Il sensore inerziale viene fabbricato contestualmente al sensore di pressione utilizzando, almeno in parte, lo stesso flusso di processo.

Come noto, un trasduttore di tipo MEMS (sistema micro-elettro-meccanico, o "micro-electro-mechanical system") comprende una struttura sensibile mobile atta a trasdurre una grandezza ambientale (pressione, movimento, onda acustica, ecc.) in una grandezza elettrica (ad esempio una variazione capacitiva). Una opportuna elettronica di lettura è atta ad effettuare operazioni di elaborazione (tra cui operazioni di amplificazione e filtraggio) di tale grandezza elettrica in modo da fornire un segnale elettrico di uscita (ad esempio una tensione elettrica) rappresentativo del valore di pressione rilevato.

Nel caso utilizzi un principio di rilevamento capacitivo, la struttura sensibile micro-elettro-meccanica comprende in generale un elettrodo mobile, realizzato come diaframma o membrana, disposto affacciato ad un elettrodo fisso, per realizzare i piatti di un condensatore di rilevamento a capacità variabile. L'elettrodo mobile è ancorato mediante una sua prima porzione, generalmente perimetrale, ad uno strato

strutturale, mentre una sua seconda porzione, generalmente centrale, è libera di muoversi o flettersi. L'elettrodo mobile e l'elettrodo fisso realizzano dunque un condensatore, e la flessione della membrana che costituisce l'elettrodo mobile causa una variazione di capacità, in funzione della grandezza da rilevare.

Trasduttori di altro tipo, ad esempio atti a rilevare un movimento o una vibrazione sono anche noti come accelerometri e giroscopi, e operano analogamente a quanto sopra descritto. La struttura di rilevamento non è, in questo caso, una membrana, ma è formata da una o più masse mobili accoppiate mediante molle ad una struttura di supporto fissa. Anche in questo caso, la trasduzione del segnale di movimento può avvenire per via capacitiva, in modo di per sé noto.

Sensori del tipo sopra menzionato, insieme ad altri sensori MEMS, sono comunemente montati in dispositivi elettronici multimediali, quali ad esempio smartphone, smartwatch, prodotti di elettronica "consumer" o altra strumentazione professionale, ecc. L'integrazione di un numero considerevole di sistemi / sensori MEMS in un dispositivo elettronico richiede l'utilizzo di schede a circuito integrato dedicate e quindi impatta in modo considerevole sull'occupazione di spazio.

Inoltre, secondo la tecnica nota, diversi sensori

sono tipicamente alloggiati in un rispettivo package che contiene il trasduttore e l'elettronica di acquisizione e pre-elaborazione dei segnali elettrici generati dal trasduttore, tipicamente un circuito ASIC. In talune soluzioni, l'ASIC può essere condiviso, come ad esempio discusso in WO 2013/061313.

Tuttavia, vi è sempre maggiore richiesta da parte del mercato di soluzioni con alto grado di integrazione, che consentano un risparmio di costi e soprattutto una riduzione di occupazione di area.

Scopo della presente invenzione è fornire una soluzione alle necessità precedentemente illustrate.

Secondo la presente invenzione vengono realizzati un procedimento di fabbricazione di un sistema MEMS ed un sistema MEMS così ottenuto, come definiti nelle rivendicazioni allegate.

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

- le figure 1-19 illustrano, in vista in sezione laterale, fasi di fabbricazione di un sistema micro-elettro-meccanico integrato, in particolare includente un sensore di pressione capacitivo ed un sensore

inerziale, secondo una forma di realizzazione della presente invenzione;

- la figura 20 illustra un sistema MEMS integrato secondo una ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione; e

- la figura 21 illustra un sistema MEMS integrato secondo una ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione.

Le figure 1-19 mostrano fasi successive di fabbricazione di un dispositivo o sistema micro-elettromeccanico (MEMS) 50 secondo una forma di realizzazione della presente invenzione. In particolare il sistema MEMS 50 integra una o più prime strutture micro-elettromeccaniche 51 per la trasduzione di un segnale di pressione ambientale in un rispettivo segnale elettrico, e una o più seconde strutture micro-elettromeccaniche 52 per la trasduzione di un segnale di movimento (vibrazione, moto, ecc.) in un rispettivo segnale elettrico.

La prima struttura micro-elettromeccanica 51 è anche denominata, nel seguito, sensore di pressione; in particolare, la trasduzione è eseguita sulla base di una variazione di una capacità (sensore di pressione capacitivo).

La seconda struttura micro-elettromeccanica 52 è

anche denominata, nel seguito, sensore inerziale. La seconda struttura micro-elettro-meccanica 52 può essere uno tra un accelerometro e un giroscopio, oppure una struttura combinata che include sia un accelerometro che un giroscopio.

Le figure 1-19 illustrano una piastrina ("die") in vista in sezione laterale, in un sistema di riferimento triassiale di assi X, Y, Z ortogonali tra loro. La piastrina 1 è, tipicamente e fino alla fase di taglio o "singolatura" ("singulation"), parte di una fetta ("wafer") non mostrata nella sua interezza

La figura 1 mostra la piastrina 1, avente un lato fronte 1a e un lato retro 1b opposti tra loro lungo l'asse Z, comprendente un substrato 2 di materiale semiconduttore, tipicamente silicio.

Con riferimento alla figura 2, in corrispondenza del lato fronte 1a, viene formato uno strato isolante 3, ad esempio ossido di silicio (SiO_2) avente un spessore compreso fra 0.2 e 2 μm , tipicamente 0.5 μm . Lo strato isolante 3 è ad esempio formato mediante ossidazione termica.

In figura 3, sullo strato isolante 3 viene formato uno strato strutturale 4, di materiale elettricamente conduttivo, ad esempio di polisilicio drogato di tipo N (es., con densità di drogaggio compresa tra $1 \cdot 10^{19}$ e $2 \cdot 10^{20}$

ioni/cm³). In una forma di realizzazione, lo strato strutturale 4 è formato mediante deposizione di polisilicio con tecnica LPCVD; lo strato strutturale 4 ha ad esempio spessore compreso tra 0.2 e 0.6 µm.

Con riferimento al sensore di pressione di tipo capacitivo, lo strato strutturale 4 forma un elettrodo inferiore del sensore di pressione (ovvero, il piatto inferiore del condensatore). Lo strato strutturale 4 viene sagomato (es., fotolitograficamente) per definire la forma desiderata e/o prevista in fase di progetto dell'elettrodo inferiore del sensore di pressione.

Quindi, figura 4, si forma uno strato sacrificale 8, ad esempio di ossido di silicio. Lo spessore di tale strato sacrificale 8, in corrispondenza, e al di sopra, dello strato strutturale 4, è compreso tra 0.4 e 2 µm. Per sopperire alla presenza dello "scalino" tra lo strato isolante 3 e lo strato strutturale 4, e formare uno strato sacrificale 8 avente una superficie superiore planare, viene eseguita, dopo la formazione dello strato sacrificale 8, una fase di planarizzazione (es., tramite CMP).

Alternativamente, è possibile formare lo strato sacrificale 8 in due sottofasi successive tra loro, comprendenti:

- formare un primo sottostrato sacrificale 8a, qui

di ossido di silicio depositato con tecnica PECVD (TEOS o ossido basato su silano), fino a copertura completa dello strato strutturale 4 (lo spessore del primo sottostrato sacrificale 8a, misurato lungo l'asse Z lateralmente allo strato strutturale 4, è maggiore dello spessore dello strato strutturale 4);

- planarizzare il primo sottostrato sacrificale 8a, ad esempio con tecnica CMP, in modo da ottenere una superficie superiore piatta; e

- formare un secondo sottostrato sacrificale 8b, qui di ossido di silicio depositato con tecnica PECVD (TEOS o ossido basato su silano), al di sopra del primo sottostrato sacrificale 8a; lo spessore del secondo sottostrato sacrificale 8b, misurato lungo l'asse Z a partire dalla superficie superiore del primo sottostrato sacrificale 8a, è compresa tra 300 nm e 2 μ m; e

- eseguire, opzionalmente, una ulteriore fase di planarizzazione del secondo sottostrato sacrificale 8b.

Il primo ed il secondo sottostrato sacrificale 8a, 8b formano, insieme, lo strato sacrificale 8. Lo spessore di tale strato sacrificale 8, in corrispondenza dello strato strutturale 4, è ad esempio compreso tra 500 nm e 2.3 μ m.

Quindi, figura 5, viene eseguito un attacco dello strato sacrificale 8 in modo da formare una trincea 10

che circonda, o delimita internamente, una regione 8' dello strato sacrificale 8. La trincea 10 si estende lungo l'asse Z per l'intero spessore dello strato sacrificale 8 al di sopra dello strato strutturale 4 ed espone rispettive regioni dello strato strutturale 4. In questo modo, la regione 8' è separata dalle restanti porzioni dello strato sacrificale 8 mediante la trincea 10. La forma della regione 8', definita dalla trincea 10, corrisponde alla forma desiderata della cavità tramite la quale sono affacciati i due piatti conduttivi del condensatore che forma l'elemento sensibile del sensore di pressione, come meglio evidente dal seguito della descrizione.

In questa stessa fase di fabbricazione, vengono altresì rimosse una o più ulteriori porzioni dello strato sacrificale 8 che si estendono al di sopra dello strato strutturale 4, ma che sono esterne alla regione 8' delimitata dalla trincea 10; si forma così una apertura 11 che raggiunge lo strato strutturale 4 e forma un accesso allo strato strutturale 4 attraverso cui, come meglio illustrato in seguito, si formerà un contatto elettrico per polarizzare lo strato strutturale 4 (che è l'elettrodo inferiore del condensatore del sensore di pressione).

Si procede quindi, figura 6, con la formazione, al

di sopra dello strato sacrificale 8 e delle porzioni superficiali dello strato strutturale 4 esposte attraverso la trincea 10 e l'apertura 11 di uno strato di interruzione attacco ("etch stop layer") 5. Lo strato di interruzione attacco 5 è, secondo una forma di realizzazione della presente invenzione, di ossido di alluminio (Al_2O_3), anche noto come allumina. Lo strato di interruzione attacco 5 ha, ad esempio, spessore di alcune decine di nanometri, ad esempio compreso tra 20 e 60 nm, in particolare 40 nm.

Lo strato di interruzione attacco 5 è formato mediante tecnica di deposizione di strato atomico (ALD - "Atomic Layer Deposition"). La deposizione di Al_2O_3 mediante tecnica ALD è nota nello stato della tecnica ed è tipicamente eseguita utilizzando come reagenti trimetil-alluminio (TMA, $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$) e vapori di acqua (H_2O). Alternativamente ai vapori di H_2O è possibile utilizzare ozono (O_3). Ad esempio, il deposito può avvenire utilizzando TMA come sorgente di alluminio e H_2O come ossidante. Il documento di Steven M. George, Chem. Rev. 2010, 110, p. 111-131, oppure il documento di Puurunen, R. L., J. Appl. Phys. 2005, 97, p. 121-301, descrivono possibili metodi di formazione dello strato di interruzione attacco 5.

Anche il documento brevettuale WO 2013/061313

descrive un metodo per la formazione di uno strato di interruzione attacco di Al_2O_3 utilizzabile nel contesto della presente invenzione. In particolare, come descritto in WO 2013/061313, lo strato di interruzione attacco 5 viene formato con un processo che prevede il deposito ALD di due strati intermedi di Al_2O_3 , entrambi sottoposti a cristallizzazione. La sequenza di: i) deposizione di un primo strato intermedio di Al_2O_3 , ii) cristallizzazione del primo strato intermedio, iii) deposizione di un secondo strato intermedio di Al_2O_3 , e iv) cristallizzazione del secondo strato intermedio, consente la formazione di uno strato di interruzione attacco 5, di Al_2O_3 con caratteristiche di resistenza all'attacco da parte di soluzioni contenenti acido idrofluoridrico (HF) e, soprattutto, di impermeabilità dello strato di interruzione attacco 5 a tali soluzioni a base di HF.

Inoltre, tale strato di interruzione attacco 5, oltre a essere resistente all'attacco con HF ed impermeabile al HF, mostra ottime proprietà di adesione allo strato 8 sottostante di ossido di silicio e allo strato 4 di polisilicio, mostra ottime proprietà dielettriche che non variano in funzione di eventuali trattamenti termici successivi, mostra scarsa (trascurabile) variazione del raggio di curvatura

("warpage") della piastrina 1, e mostra una elevata compatibilità con processi termici ad alta temperatura (superiore ai 1000°C).

Quindi, figura 7, si procede con una fase di sagomatura o "patterning" (es., mediante attacco mascherato utilizzando una maschera di attacco 13) dello strato di interruzione attacco 5, al fine di rimuoverlo selettivamente in corrispondenza della regione 8', dal fondo dell'apertura 11 (per esporre lo strato strutturale 4 nell'apertura 11) e in corrispondenza di una regione 12 periferica della piastrina 1. Nella regione 12 verranno formati segni di allineamento, per favorire le successive fasi di fabbricazione, e/o ancoraggi per donare solidità strutturale alle strutture mobili del sensore inerziale che verranno formate nel seguito.

In particolare si nota che lo strato di interruzione attacco 5 viene sagomato rimuovendo porzioni selettive dello stesso al di sopra della regione 8', fino a raggiungere la superficie della regione 8'. Almeno una porzione della superficie della regione 8' è così esposta attraverso l'apertura così formata nello strato di interruzione attacco 5. La zona della regione 8' esposta in questa fase di processo definisce più precisamente ed ulteriormente rispetto alla trincea 10 la forma e

l'estensione spaziale del piatto superiore del condensatore che forma l'elemento attivo del sensore di pressione, come meglio evidente dal seguito della descrizione.

Quindi, figura 8, si esegue una fase di deposizione di uno strato strutturale 16 al di sopra dello strato di interruzione attacco 15 e nella cavità 15a, coprendo la superficie della regione 8'. In una forma di realizzazione, lo strato strutturale 16 è di materiale conduttivo, ad esempio di polisilicio drogato (es., con drogaggio compreso tra $1 \cdot 10^{18}$ e $2 \cdot 10^{20}$ ioni/cm³). In alternativa, lo strato strutturale 16 può essere di polisilicio non drogato.

Lo strato strutturale 16 è ad esempio depositato con tecnica LPCVD. Lo strato strutturale 16 ha spessore, ad esempio, compreso tra 0.2 µm e 1 µm.

Lo strato strutturale 16 si estende all'interno dell'apertura 11, fino a raggiungere e contattare lo strato strutturale 4, e nell'apertura 12.

In seguito, figura 9, lo strato strutturale 16 viene definito, ad esempio fotolitograficamente, per rimuoverlo selettivamente in corrispondenza della superficie esposta della regione 8'. In particolare, in una forma di realizzazione, lo strato strutturale 16 non viene rimosso completamente in corrispondenza della

superficie della regione 8', in modo da lasciare regioni 16' che fungono da ancoraggio per un successivo strato che verrà depositato in seguito (strato 20, illustrato in figura 10). Risulta evidente che, in altre forme di realizzazione, qualora si ritenesse che tale ancoraggio non è necessario per supportare strutturalmente lo strato 20 di figura 10, le regioni 16' non vengono formate e lo strato strutturale 16 viene completamente rimosso in corrispondenza della superficie della regione 8'.

Quindi, figura 10, come anticipato, viene formato uno strato permeabile 20 al di sopra dello strato strutturale 16, delle regioni di ancoraggio 16' (se presenti) e della regione 8' esposta tra le regioni di ancoraggio 16'.

Lo strato permeabile 20 è, in una forma di realizzazione della presente invenzione, di polisilicio permeabile alla soluzione chimica utilizzata per la successiva rimozione della regione 8'. Ad esempio, nella forma di realizzazione descritta, in cui la regione 8' è di ossido di silicio, è possibile utilizzare acido idrofluoridrico (HF), o soluzioni contenenti HF, per rimuovere selettivamente la regione 8'. In questo caso, lo strato permeabile 20 è provvisto di pori o aperture atte a consentire il passaggio dell'acido

idrofluoridrico attraverso lo strato permeabile 20, raggiungendo e rimuovendo la regione 8' e formando una cavità o camera sepolta 22.

Lo strato permeabile 20 è in particolare di silicio policristallino, avente fori (o pori) con un diametro che varia da 1 a 50 nm. Lo spessore dello strato permeabile 20 è nell'intervallo da 50 a 150 nm, per esempio di 100 nm. Lo strato permeabile 20 è ad esempio depositato mediante tecnica LPCVD. Secondo una forma di realizzazione esemplificativa, non limitativa, le condizioni di deposizione sono nella regione di transizione da trazione a compressione, con una finestra di processo attorno ai 600°C utilizzando un gas sorgente silano, in un ambiente di deposizione con una pressione di circa 550 mtorr. Le dimensioni dei pori dello strato permeabile 20 sono, in generale, scelte in modo tale che la soluzione di attacco chimico (liquida o gassosa) utilizzata per rimuovere la regione 8' possa penetrare attraverso i pori fino a raggiungere lo strato permeabile 20.

In generale, lo strato permeabile 20 può essere polisilicio poroso, formato in modo noto in letteratura, o polisilicio avente fori (aperture) formate attivamente in seguito alla sua deposizione, mediante azione meccanica o fisico-chimica di rimozione selettiva di

materiale.

In riferimento alla figura 11, una fase di attacco chimico della regione 8' viene eseguita con HF o miscela di HF tamponato o con tecniche di attacco chimico a vapore utilizzando HF in forma di vapore. Il materiale della regione 8' viene completamente rimosso e viene formata la cavità sepolta 22. Come detto, l'agente chimico utilizzato per l'attacco permea attraverso le aperture o pori dello strato permeabile 20 ma non attraverso lo strato strutturale 16 e lo strato di interruzione attacco 5.

Quindi, figura 12, viene formata una ulteriore maschera 14 sullo strato permeabile 20, configurata per proteggere il fronte 1a della piastrina 1 ad eccezione di una regione coincidente con l'apertura 12. Vengono così rimossi tutti gli strati esposti attraverso la maschera 14, fino a raggiungere il substrato 2. Si forma così una apertura 23.

Quindi, figura 13, dopo aver rimosso la maschera 14, viene formato (es., cresciuto epitassialmente) al di sopra dello strato permeabile 20 uno strato di polisilicio drogato 17 (ad esempio di tipo N). Tale strato di polisilicio drogato cresce anche nell'apertura 23 al di sopra del substrato 2, esposto nella fase di figura 12. Lo spessore dello strato di polisilicio

drogato 17 è, ad esempio, nell'intervallo 0.2 - 1.5 μm . È possibile, opzionalmente, depositare un ulteriore strato di polisilicio, o altro materiale, avente una superficie corrugata, al fine di prevenire eventuali fenomeni di adesione ("stiction") che potrebbero verificarsi durante l'uso del sensore inerziale. Alternativamente, è opzionalmente possibile trattare (meccanicamente o chimicamente) la superficie dello strato di polisilicio 17 al fine di realizzare tale superficie corrugata.

In figura 14, lo strato di polisilicio drogato 17 viene attaccato in modo da rimuovere porzioni selettive dello stesso per formare una pluralità di regioni conduttive 18. Le regioni conduttive 18 includono piste ("strips") conduttive o interconnessioni elettriche in corrispondenza di una regione 1' della piastrina 1 in cui verrà formato il sensore inerziale; le regioni conduttive 18 includono l'elettrodo superiore del condensatore del sensore di pressione in corrispondenza di una regione 1" della piastrina 1 in cui verrà formato il sensore di pressione.

L'attacco dello strato di polisilicio 17 rimuove gli strati 17, 20 e 16, e si interrompe in corrispondenza dello strato di interruzione attacco 5.

Quindi, figura 15, viene formato uno strato

sacrificale 25, ad esempio di ossido di silicio, in particolare ossido TEOS. Viene quindi eseguita una fase di politura (CMP) dello strato sacrificale 25, al termine della quale lo strato sacrificale 25 ha uno spessore, lungo Z, compreso tra 1.3 e 2 μm . Lo strato sacrificale 25 si estende anche all'interno delle aperture che separano tra loro le piste conduttive / interconnessioni elettriche / elettrodo superiore, definiti con riferimento alla figura 14.

Lo strato sacrificale 25 viene formato anche all'interno dell'apertura 23.

Quindi, figura 16, lo strato sacrificale 25 viene selettivamente attaccato per rimuoverlo completamente dall'interno dell'apertura 23 ed in regioni selettive al di sopra dello strato di polisilicio 17, per formare aperture di ancoraggio 27.

Quindi, figura 17, viene formato al di sopra dello strato sacrificale 25, nell'apertura 23 e nelle ulteriori aperture di ancoraggio 27 uno strato strutturale 28, ad esempio crescendo polisilicio epitassiale.

Lo strato strutturale 28 può essere lavorato secondo necessità, per formare strutture aventi una conformazione desiderata.

In figura 18, lo strato strutturale 28 è attaccato

selettivamente per formare strutture sospese 28a (es., uno statore e un rotore), e terminali di contatto elettrico 29, 30 configurati per polarizzare gli elettrodi superiore e inferiore del condensatore del sensore di pressione. Nella stessa fase di processo, vengono rimosse porzioni dello strato strutturale 28 che si estendono sulla membrana del sensore di pressione (almeno in parte sopra la cavità 22)

Si fa notare, tuttavia, che in questa fase di fabbricazione, strutture sospese 28a sono ancora vincolate allo strato sacrificale 25 sottostante, e dunque non sono liberi di compiere movimenti. Lo strato sacrificale 25 si estende altresì al di sopra della membrana che forma l'elettrodo superiore del condensatore del sensore di pressione, che risulta troppo spessa e almeno parzialmente vincolata nei movimenti.

Sono quindi formati, figura 19, in corrispondenza delle strutture sospese 28a, fori passanti ("through holes") 31 per consentire la rimozione dello strato sacrificale 25 così da sospendere parzialmente le strutture sospese 28a.

Una fase di attacco, ad esempio in HF, attraverso i fori passanti 31 consente di rimuovere porzioni dello strato sacrificale 25. Le strutture sospese 28a possono

quindi muoversi o oscillare secondo i gradi di libertà previsti in fase di progetto. La forma e i dettagli di progetto delle strutture sospese mobili 28a sono di per sé noti nello stato della tecnica, e non sono oggetto della presente invenzione.

Nella stessa fase di processo viene altresì rimossa la porzione dello strato sacrificale 25 che si estende sulla membrana del sensore di pressione.

Viene così completata la formazione della prima struttura micro-elettro-meccanica 51 (qui, un sensore di pressione capacitivo) e della seconda struttura micro-elettro-meccanica 52 (qui, un sensore inerziale) del sistema MEMS 50.

La fabbricazione del sistema MEMS 50 può comprendere ulteriori fasi, ad esempio di formazione e accoppiamento di un cappuccio ("cap"), non illustrato, a protezione delle prima e seconda struttura micro-elettro-meccanica 51, 52. Il cappuccio comprende regioni di accoppiamento meccanico, provviste di pasta saldante o nastro adesivo, o altri mezzi di accoppiamento, configurate per essere fisicamente accoppiate a rispettive regioni della piastrina 1 in modo da circondare (in vista superiore) e proteggere la prima e la seconda struttura micro-elettro-meccanica 51, 52. Fori passanti sono formati nel cappuccio in

corrispondenza del sensore di pressione, per consentire un accesso fluidico verso la membrana (ovvero, un accesso della pressione ambientale che si intende rilevare / misurare durante l'uso).

Uno strato di "getter", di tipo di per sé noto, è opzionalmente presente per generare una pressione predefinita (bassa pressione) in corrispondenza del sensore inerziale 52.

Come detto, in una forma di realizzazione, il sensore di pressione 51 è di tipo capacitivo, ancora più in particolare un sensore di pressione assoluto configurato per rilevare una variazione di pressione esterna al sensore rispetto al valore di pressione presente all'interno della cavità sepolta 22 (impostato in fase di fabbricazione). Il primo ed il secondo elettrodo sono affacciati tra loro attraverso la cavità sepolta 22. Secondo una diversa ed ulteriore forma di realizzazione, il sensore di pressione 51 è di tipo capacitivo differenziale, configurato per fornire un segnale identificativo della differenza tra due pressioni ambientali a cui il sensore stesso è esposto. Il sensore di pressione differenziale è fabbricato secondo gli stessi passi precedentemente descritti per il sensore di pressione 51, con l'aggiunta di una ulteriore fase di processo volta a collegare la cavità

22 verso l'esterno, al fine di poter operare il sensore di pressione come sensore differenziale. A questo fine, la cavità 22 è fluidicamente collegata verso l'esterno del sensore di pressione, ad esempio tramite un canale realizzato opportunamente che consente il passaggio di aria (o altro fluido in forma gassosa) da e verso la cavità 22. La deformazione risultante della membrana è indicativa della differenza tra una prima pressione ambientale P1 (esterna alla cavità 22) e una seconda pressione ambientale P2 (interna alla cavità 22), ed il segnale trasdotto dal sensore di pressione differenziale è un segnale di pressione differenziale. In uso, le pressioni P1 e P2 sono pressioni di ambienti tra loro separati. I documenti brevettuali US7,763,487 e US8,008,738 descrivono packages utilizzabili nel contesto della presente invenzione, per incapsulare un sensore di pressione di tipo differenziale.

In una ulteriore forma di realizzazione, figura 20, il sensore di pressione 51 comprende inoltre una ulteriore cavità o camera sepolta 60 estendentesi nel substrato 2, al di sotto della cavità 22. In questo modo, la porzione di piastrina 1 al di sopra della cavità sepolta 60 forma una ulteriore membrana che può deflettere per scaricare eventuali stress residui dalla fabbricazione o che si possono presentare durante l'uso

del sensore di pressione, prevenendo eventuali problemi strutturali quali rotture, crepe, deformazioni. La cavità sepolta 60 può essere formata in modo di per sé noto, ad esempio secondo il processo di formazione di cavità sepolte descritto in US7,763,487 e US8,008,738.

Secondo una ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione, illustrata in figura 21, la cavità 22 comprende inoltre uno strato di anti-adesione ("anti-stiction") 65. Lo strato di anti-adesione 65 può coprire completamente le pareti interne della cavità 22, oppure solo parzialmente.

Lo strato di anti-adesione 65 è di un materiale scelto in modo tale da limitare o evitare l'occlusione anche solo parziale della cavità 22 a causa di una potenziale adesione reciproca delle pareti che delimitano superiormente e inferiormente la cavità 22. Questo effetto indesiderato causerebbe l'impossibilità di corretto movimento della membrana e conseguente fallimento del sensore di pressione 51.

Lo strato di anti-adesione 65 può essere introdotto nella cavità 22 tramite una opportuna apertura che metta in comunicazione la cavità 22 con l'ambiente in cui avviene la deposizione dello strato di anti-adesione 65. Tale apertura può in seguito essere chiusa nel caso di sensore di pressione assoluto, oppure può essere

l'apertura utilizzata per mettere in comunicazione fluidica la cavità 22 con l'ambiente esterno nel caso di sensore di pressione differenziale.

La deposizione dello strato di anti-adesione 65 può avvenire mediante procedimento in fase vapore.

Materiali utilizzabili per lo strato di anti-adesione 65 includono, ma non sono limitati a, clorosilani, triclorosilani, diclorosilani, siloxani, ecc., come ad esempio:

DDMS - "dimethyldichlorosilane";

FOTS - "perfluorooctyltrichlorosilane";

PF10TAS - "perfluorodecyltris(dimethylamino)silane";

PFDA - "perfluorodecanoic acid".

Materiali utilizzabili, e i relativi processi di deposizione, sono noti nello stato della tecnica, in particolare da Ashurst, W. & Carraro, C. & Maboudian, Roya. (2004), "Vapor phase anti-stiction coatings for MEMS" Device and Materials Reliability, IEEE Transactions on. 3. 173-178. 10.1109/TDMR.2003.821540.

Un analogo strato di anti-adesione può altresì essere opzionalmente formato nella camera sepolta 60.

I procedimenti di fabbricazione e i dispositivi sopra descritti, secondo le varie forme di realizzazione, presentano numerosi vantaggi.

Grazie alla struttura monolitica della membrana,

sostanzialmente priva di zone vuote, la membrana è robusta e quindi particolarmente adatta alla realizzazione di strutture MEMS di differente tipo, riducendo rischi di rottura, deformazione o danni che ne pregiudichino la funzionalità.

Il processo è di semplice realizzazione, dato che esso non presenta particolari criticità o difficoltà di esecuzione, garantendo quindi elevate rese e costi finali ridotti. Si nota inoltre che il procedimento di fabbricazione delle strutture di trasduzione dei sensori MEMS 51 e 52 richiede l'utilizzo di una singola fetta di materiale semiconduttore, risultando così economicamente vantaggioso e con ridotte criticità dovute all'assenza di fasi di incollaggio o bonding tra fette.

Inoltre, il procedimento di fabbricazione è particolarmente flessibile, in quanto consente di realizzare cavità sepolte e/o membrane della forma e delle dimensioni desiderate, sia per quanto riguarda l'area che lo spessore, in modo semplice. In particolare, per l'applicazione come sensore di pressione, è possibile ottenere un elevato spessore della membrana, in modo da aumentare l'accuratezza del sensore stesso.

L'uso del silicio poroso garantisce l'ottenimento di una membrana di forma regolare ed evitando formazioni indesiderate che comprometterebbero o comunque

ridurrebbero le caratteristiche elettriche/meccaniche del dispositivo MEMS finito.

La presenza simultanea dei due strati di ossido di alluminio cristallizzato previene i corto circuiti tra gli elettrodi superiore e inferiore del condensatore e consente di definire, in fase di fabbricazione, il diametro della membrana, che non è dipendente dal tempo di attacco.

Inoltre, grazie all'utilizzo dello strato di ossido di alluminio cristallizzato, è possibile definire con precisione la dimensione della membrana, senza utilizzare un attacco a tempo. Infatti, l'ossido di alluminio cristallizzato funge da maschera dura ("hard mask") per il successivo attacco HF volto a rimuovere lo strato di ossido sotto la membrana.

L'uso di uno strato di polisilicio permeabile al HF abilita la formazione di una griglia porosa che permette all'HF di permeare e attaccare l'ossido. Il polisilicio permeabile serve anche come supporto per gli strati superiori.

La contestuale fabbricazione del sensore inerziale consente una ottimizzazione dell'integrazione dei vari sensori sulla stessa piastrina, semplificando il processo e abbattendo i costi.

Risulta infine chiaro che al procedimento e al

dispositivo 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.

L'insegnamento della presente invenzione può essere utilizzato per realizzare dispositivi MEMS di differente tipo rispetto a quelli descritti, quali accelerometri, giroscopi, risonatori, valvole, e simili, nel qual caso le strutture al di sotto e/o al di sopra della membrana vengono adattate a seconda dell'applicazione prevista.

Nel caso che sia desiderato integrare componenti elettronici nella stessa piastrina 1 (es., un ASIC o altri circuiti di processamento o trattamento segnali), questo può essere effettuato utilizzando il substrato 2 oppure ulteriori strati epitassiali formati tra il substrato 2 e lo strato strutturale 4.

RIVENDICAZIONI

1. Procedimento per la fabbricazione di un sistema micro-elettro-meccanico, MEMS, (50) includente un primo dispositivo MEMS (51) ed un secondo dispositivo MEMS (52), comprendente le fasi di:

formare, su un substrato (2), un primo elettrodo (3) del primo dispositivo MEMS (51);

formare, sul primo elettrodo (3), un primo strato sacrificale (8, 8') di un materiale che può essere rimosso mediante una soluzione chimica di attacco;

formare, sul primo strato sacrificale (8, 8') uno strato di protezione (5) impermeabile a detta soluzione chimica di attacco;

rimuovere selettivamente porzioni dello strato di protezione (5) per esporre una rispettiva porzione sacrificale (8') del primo strato sacrificale (8, 8');

formare, sulla porzione sacrificale (8'), uno strato di membrana (20) di un materiale poroso, che è permeabile a detta chimica di attacco;

formare una cavità (22) rimuovendo la porzione sacrificale (8') attraverso lo strato di membrana (20) utilizzando detta chimica di attacco;

formare un primo strato strutturale (17) che sigilla pori dello strato di membrana (20) e forma, con lo strato di membrana, una struttura sospesa (17, 20) del primo

dispositivo MEMS (51), detta struttura sospesa (17, 20) essendo un secondo elettrodo capacitivamente accoppiato al primo elettrodo (3) attraverso la cavità (22);

- formare, al di sopra del primo strato strutturale (17), un secondo strato sacrificale (25) di un materiale che può essere attaccato mediante detta chimica di attacco;

- formare un secondo strato strutturale (28) al di sopra di, ed in contatto con, il secondo strato sacrificale (25);

- sagomare il secondo strato strutturale (28) per formare contestualmente strutture mobili (28a) del secondo dispositivo MEMS (52) e strutture di polarizzazione (30) del primo e del secondo elettrodo del primo dispositivo MEMS (51, 52);

- rimuovere porzioni selettive del secondo strato sacrificale (25) mediante detta chimica di attacco, rendendo dette strutture mobili (28a) del secondo dispositivo MEMS (52) e detta struttura sospesa del primo dispositivo MEMS (51) liberi di muoversi secondo rispettivi gradi di libertà.

2. Procedimento secondo la rivendicazione 1, in cui detta soluzione chimica di attacco comprende acido idrofluoridrico, HF, e detto strato di protezione (5) include Ossido di Alluminio cristallizzato.

3. Procedimento secondo la rivendicazione 1 o la rivendicazione 2, in cui lo strato di membrana (20) è di silicio poroso o di silicio presentante una pluralità di

fori o pori passanti.

4. Procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui il primo strato strutturale (17) è di polisilicio drogato conduttivo.

5. Procedimento secondo la rivendicazione 4, in cui formare detto secondo strato strutturale (28) include rimuovere porzioni selettive del secondo strato sacrificale (25) e formare parte del secondo strato strutturale (28) attraverso dette porzioni rimosse del secondo strato sacrificale (25) fino a raggiungere e contattare elettricamente il primo strato strutturale (17).

6. Procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui la fase di formare il secondo strato strutturale comprende crescere epitassialmente polisilicio.

7. Procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre la fase di formare una camera sepolta (42) nel substrato (2) al di sotto della, ed almeno in parte allineata alla, cavità (22).

8. Procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre la fase di collegare fluidicamente la cavità (22) con un ambiente esterno a detto sistema micro-elettro-meccanico (50) tramite una apertura passante.

9. Procedimento secondo la rivendicazione 8, comprendente inoltre la fase di coprire internamente la

cavità (22) mediante uno strato anti-adesione (65) facendo fluire attraverso detta apertura passante specie chimiche includenti clorosilani, triclorosilani, diclorosilani, siloxani.

10. Procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui dette strutture mobili (28a) del secondo dispositivo MEMS (52) includono una massa mobile di un giroscopio e/o una massa mobile di un accelerometro.

11. Procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detto primo dispositivo MEMS (51) include un sensore di pressione capacitivo e detto secondo dispositivo MEMS (52) include un sensore inerziale.

12. Sistema micro-elettro-meccanico, MEMS, (50) includente un primo dispositivo MEMS (51) ed un secondo dispositivo MEMS (52), e comprendente:

un substrato (2);

un primo elettrodo (3) appartenente al primo dispositivo MEMS (51) estendentesi sul substrato (2);

un primo strato sacrificale (8, 8'), di un materiale che può essere rimosso mediante una soluzione chimica di attacco, sul primo elettrodo (3);

uno strato di protezione (5), impermeabile a detta soluzione chimica di attacco, sul primo strato sacrificale (8, 8');

uno strato di membrana (20), di un materiale poroso che è permeabile a detta chimica di attacco, sulla porzione sacrificale (8');;

una cavità (22) estendentesi sotto lo strato di membrana (20);

un primo strato strutturale (17) che sigilla pori dello strato di membrana (20) e forma, con lo strato di membrana, una struttura sospesa (17, 20) del primo dispositivo MEMS (51), detta struttura sospesa (17, 20) essendo un secondo elettrodo capacitivamente accoppiato al primo elettrodo (3) attraverso la cavità (22); e

un secondo strato strutturale (28) sagomato per formare strutture mobili (28a) del secondo dispositivo MEMS (52) e strutture di polarizzazione (30) del primo e del secondo elettrodo del primo dispositivo MEMS (51, 52),

in cui dette strutture mobili (28a) del secondo dispositivo MEMS (52) e detta struttura sospesa del primo dispositivo MEMS (51) sono liberi di muoversi secondo rispettivi gradi di libertà.

13. Sistema secondo la rivendicazione 12, in cui detta soluzione chimica di attacco comprende acido idrofluoridrico, HF, e detto strato di protezione (5) include Ossido di Alluminio cristallizzato.

14. Sistema secondo la rivendicazione 12 o la rivendicazione 13, in cui lo strato di membrana (20) è di

silicio poroso o di silicio presentante una pluralità di fori o pori passanti.

15. Sistema secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 12-14, in cui il primo strato strutturale (17) è di polisilicio drogato conduttivo.

16. Sistema secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 12-15, in cui il secondo strato strutturale è di polisilicio epitassiale.

17. Sistema secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 12-16, comprendente inoltre una camera sepolta (42) nel substrato (2) al di sotto della, ed almeno in parte allineata alla, cavità (22).

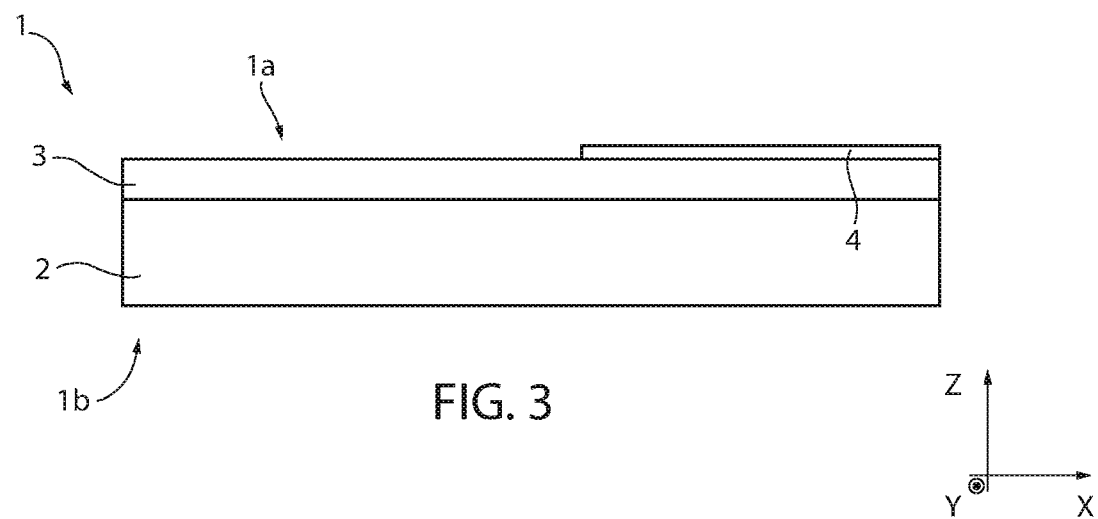
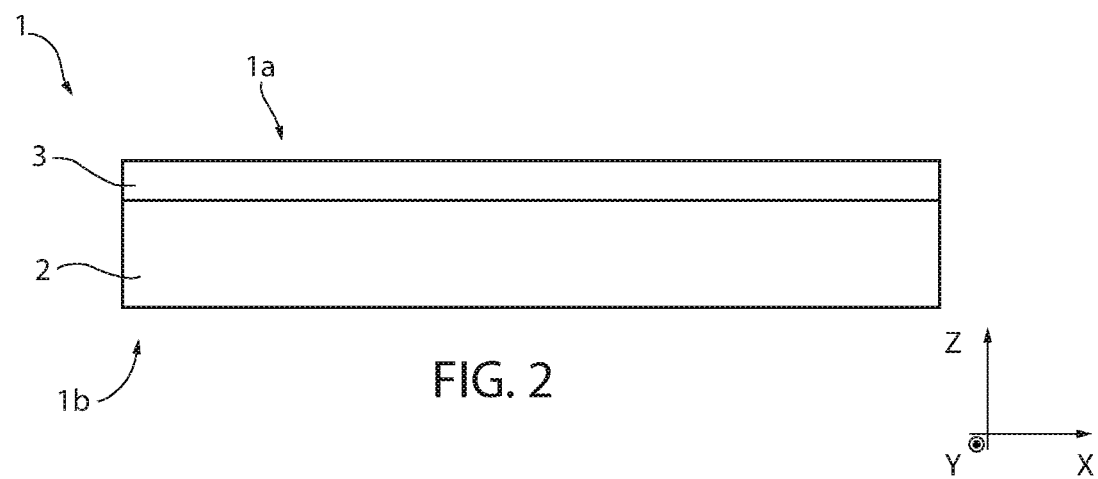
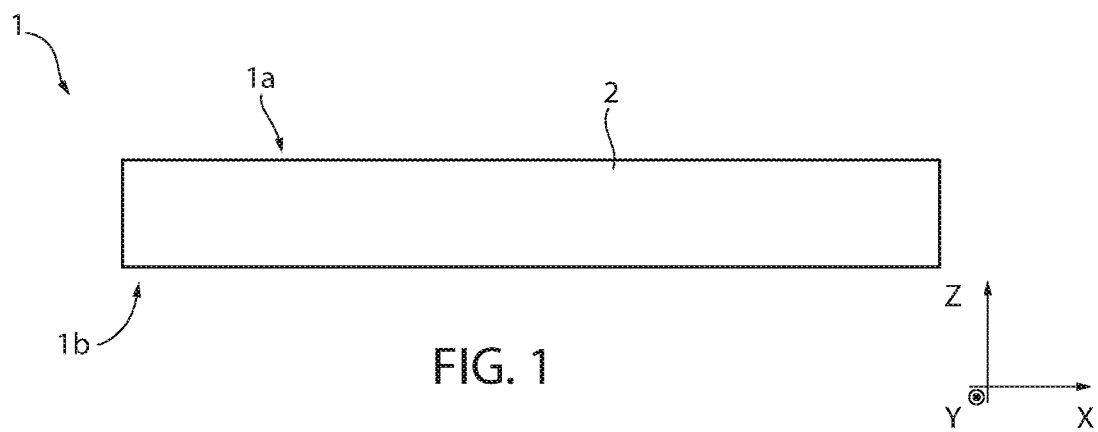
18. Sistema secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 12-17, comprendente inoltre un percorso di collegamento fluidico configurato per collegare la cavità (22) con un ambiente esterno a detto sistema micro-elettro-meccanico (50) tramite una apertura passante.

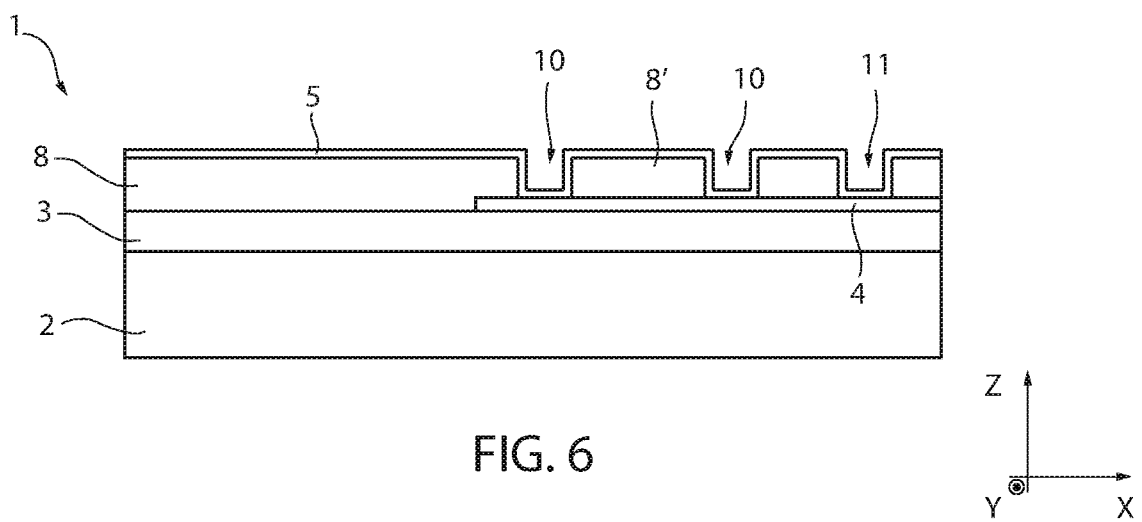
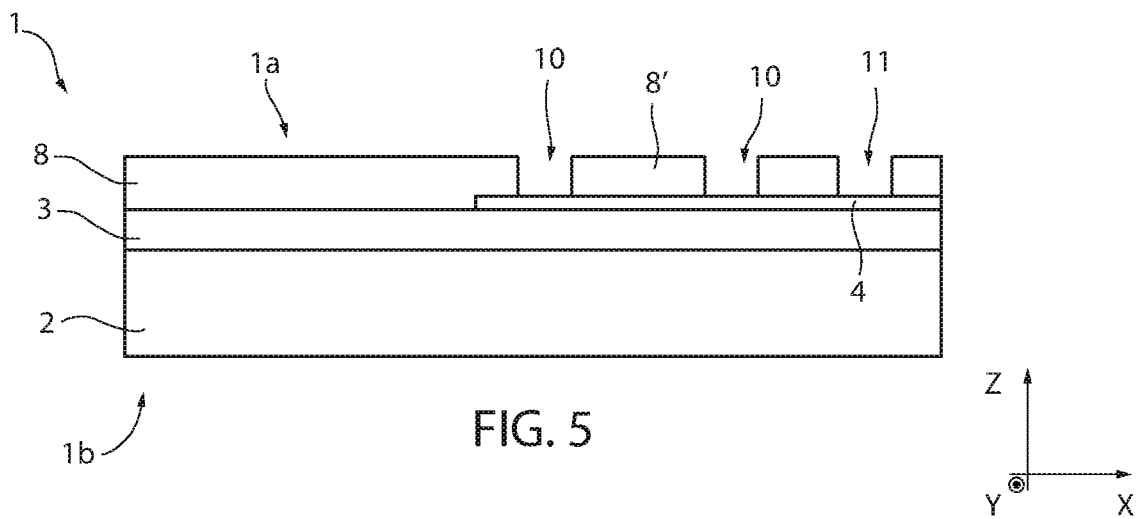
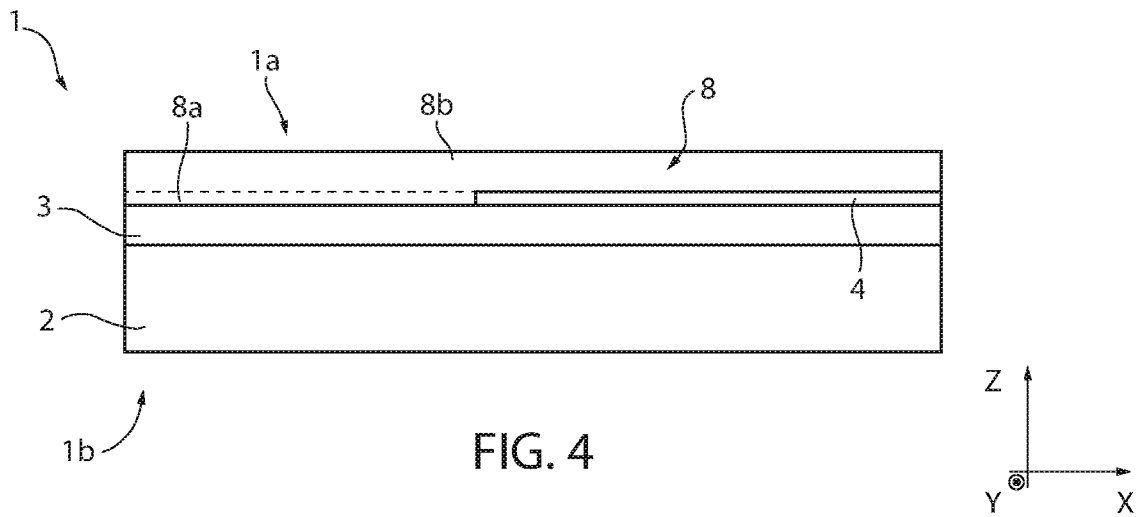
19. Sistema secondo la rivendicazione 18, comprendente inoltre uno strato anti-adesione (65) che copre internamente la cavità (22), lo strato anti-adesione includendo clorosilani, triclorosilani, diclorosilani, siloxani.

20. Sistema secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 12-19, in cui dette strutture mobili (28a) del secondo dispositivo MEMS (52) includono una massa mobile di un giroscopio e/o una massa mobile di un accelerometro.

21. Sistema secondo una qualsiasi delle rivendicazioni

12-20, in cui detto primo dispositivo MEMS (51) include un sensore di pressione capacitivo e detto secondo dispositivo MEMS (52) include un sensore inerziale.





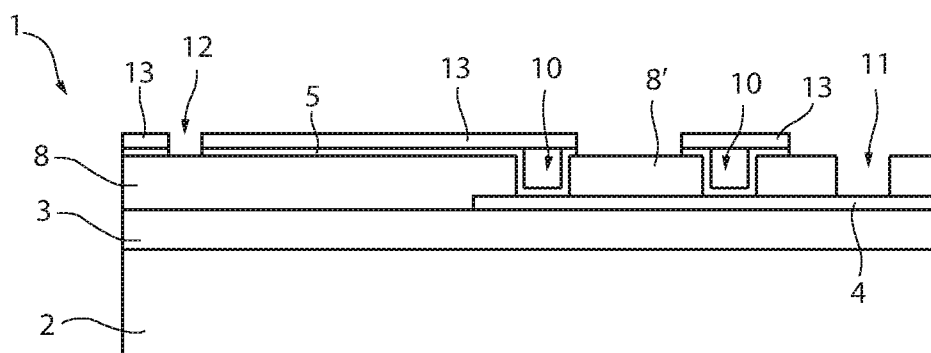


FIG. 7

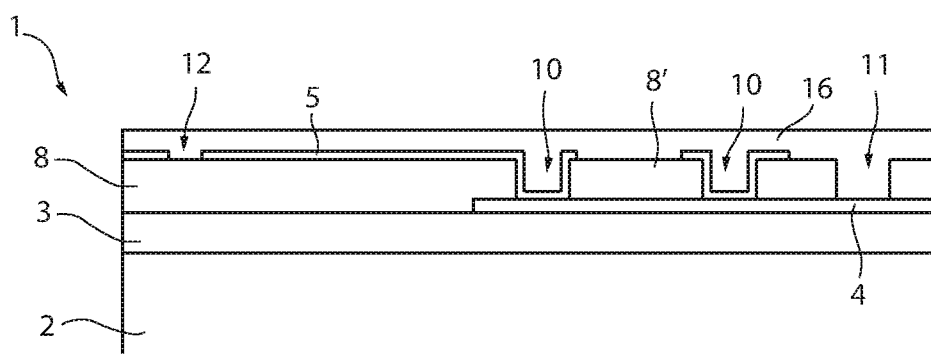
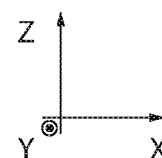


FIG. 8

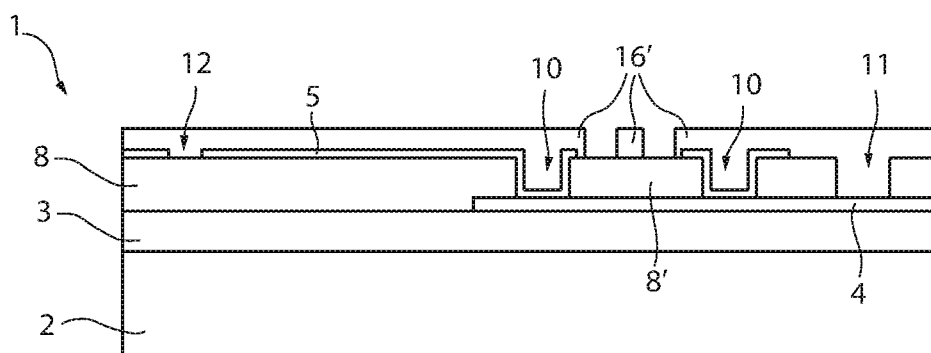
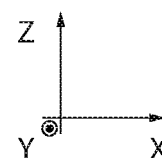
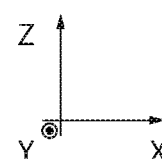
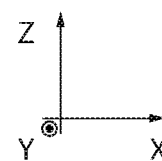
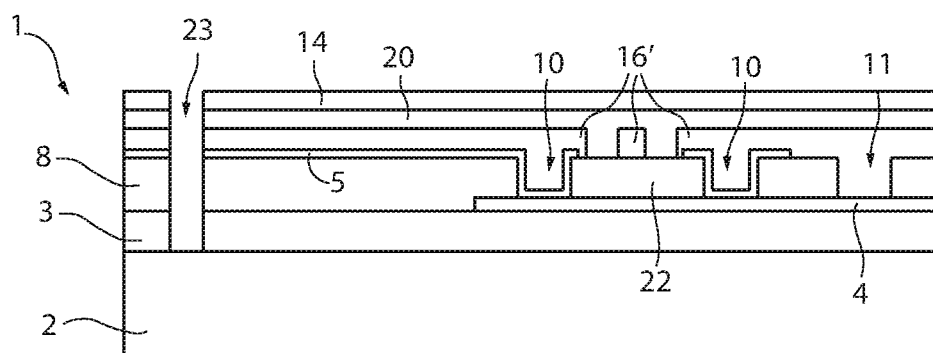
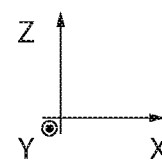
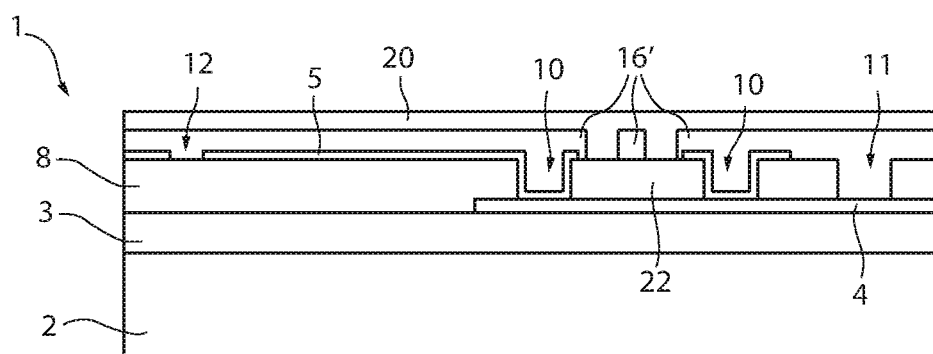
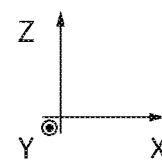
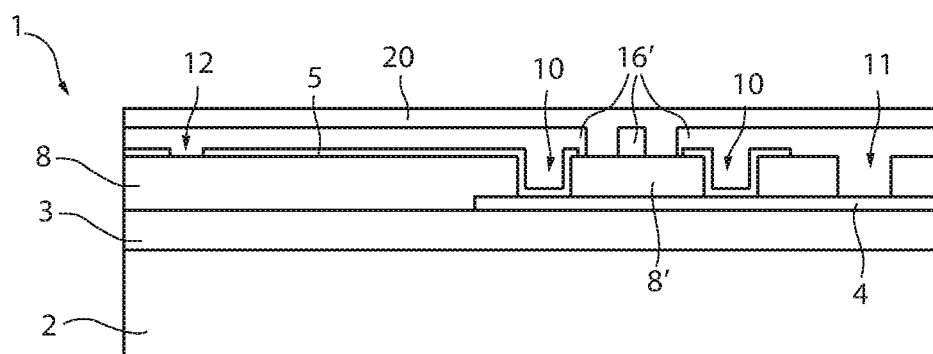


FIG. 9





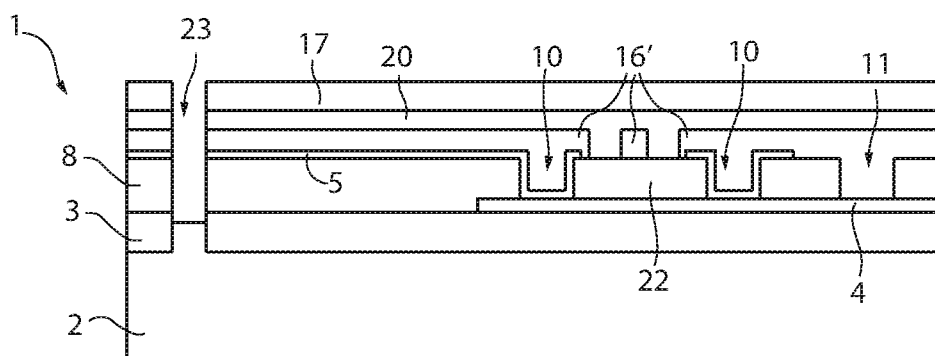


FIG. 13

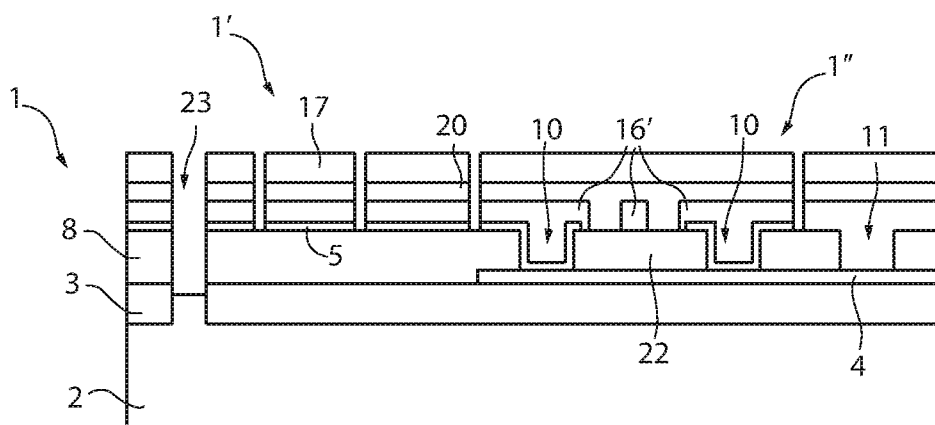
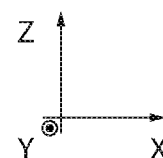


FIG. 14

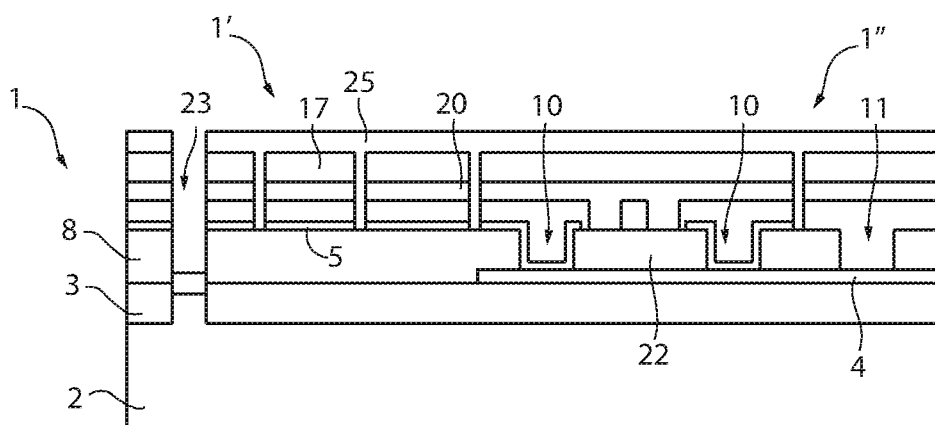
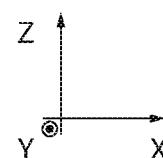
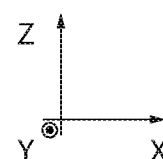


FIG. 15



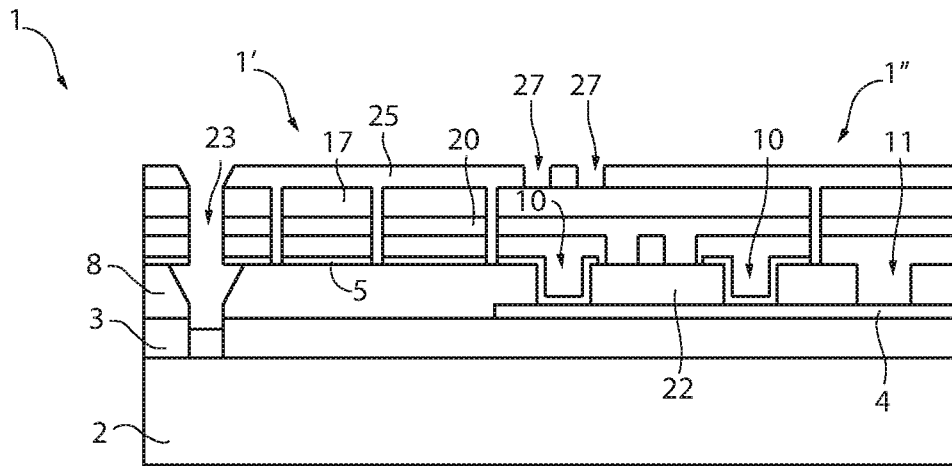


FIG. 16

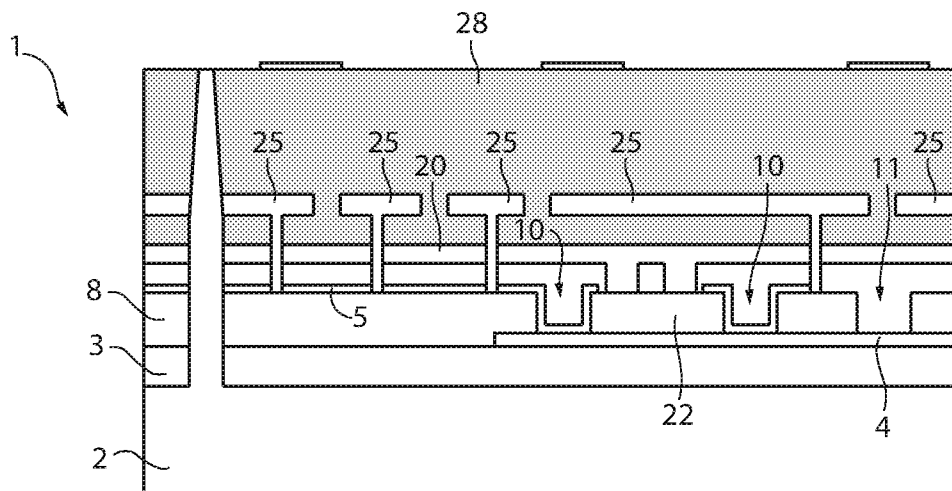
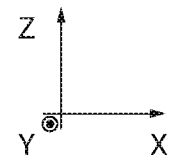
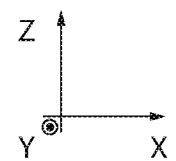


FIG. 17



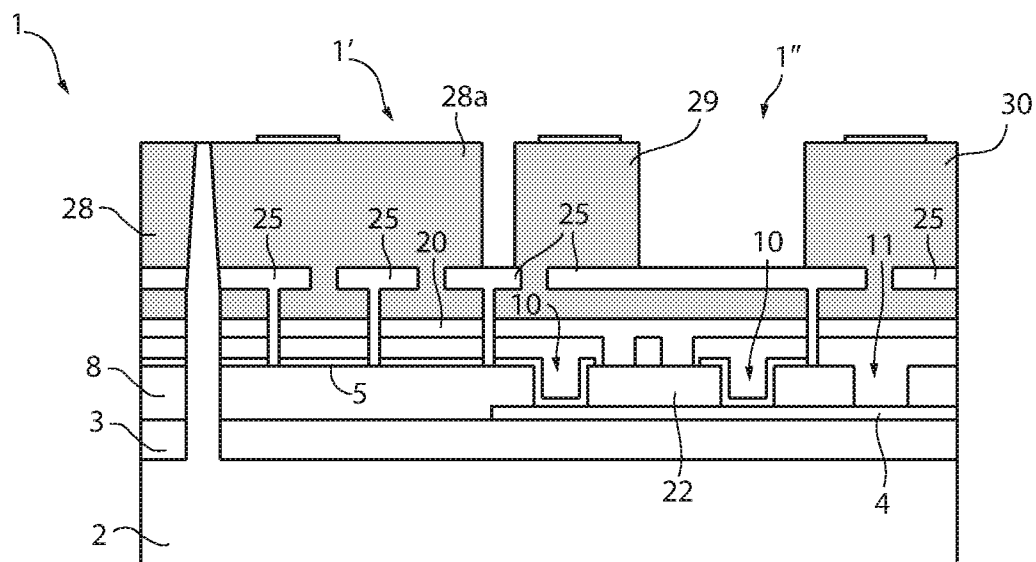


FIG. 18

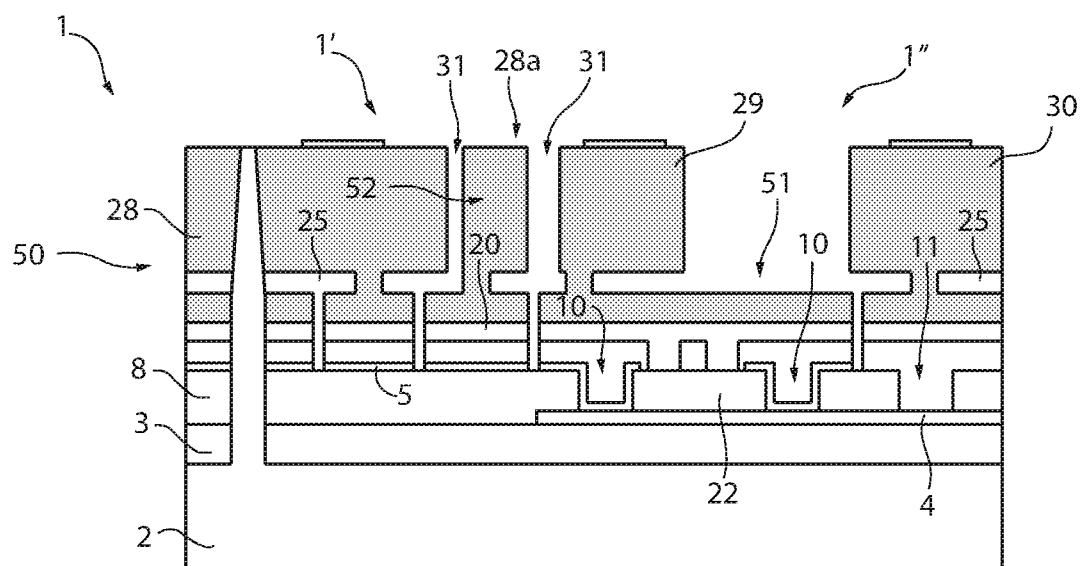
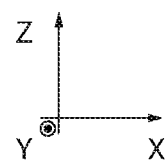
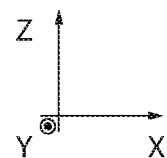


FIG. 19



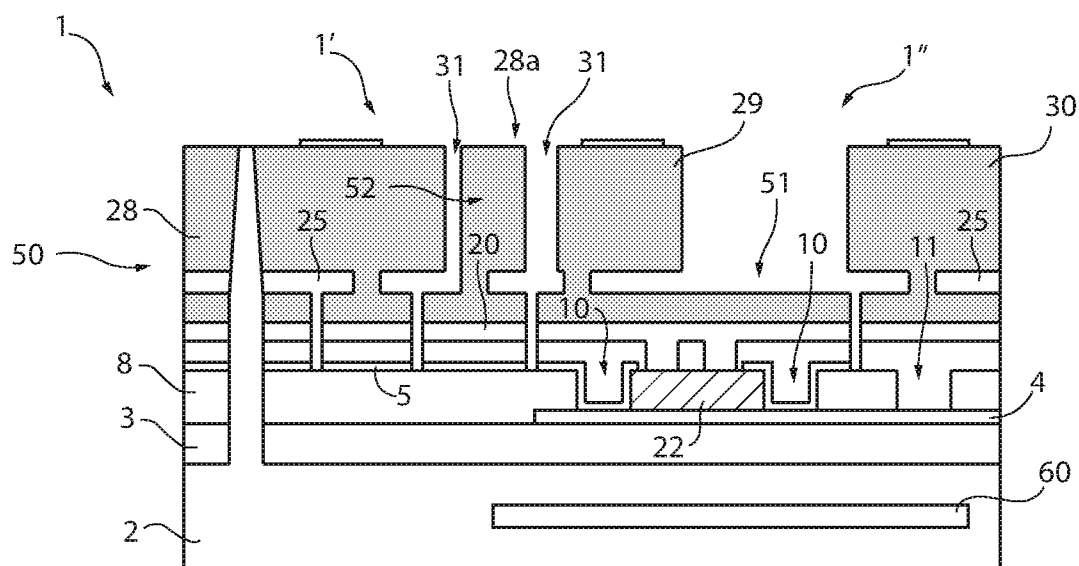


FIG. 20

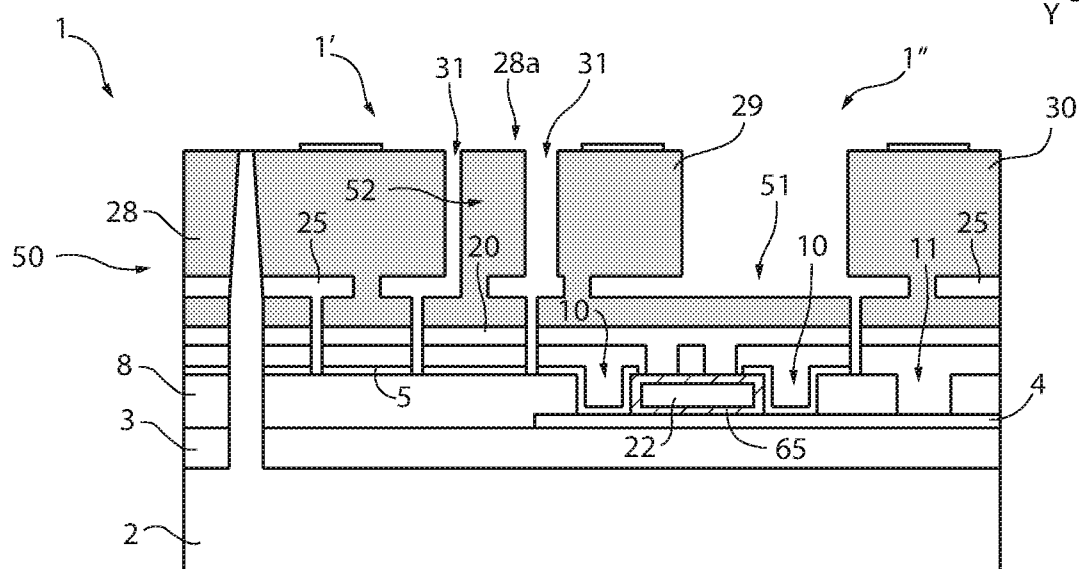
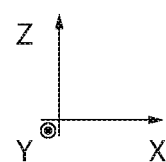


FIG. 21

