



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102015000087710
Data Deposito	24/12/2015
Data Pubblicazione	24/06/2017

Classifiche IPC

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
H	01	L	41	09

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
H	01	L	41	113

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
H	01	L	41	22

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
H	02	N	2	18

Titolo

DISPOSITIVO PIEZOELETTRICO MEMS E RELATIVO PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:
"DISPOSITIVO PIEZOELETTRICO MEMS E RELATIVO PROCEDIMENTO DI
FABBRICAZIONE"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI, 2

AGRATE BRIANZA (MB)

Inventori: BEVILACQUA Maria Fortuna, VILLA Flavio
Francesco, SCALDAFERRI Rossana, CASUSCELLI Valeria, DI
MATTEO Andrea, FARALLI Dino

* * *

La presente invenzione è relativa ad un dispositivo piezoelettrico MEMS (dall'inglese "Micro-Electromechanical Systems") e ad un relativo procedimento di fabbricazione.

La seguente trattazione farà particolare riferimento all'utilizzo di tale dispositivo piezoelettrico MEMS come micro-generatore di energia per applicazioni di recupero di energia (solitamente note come "energy harvesting" o "energy scavenging").

Come noto, sistemi per l'estrazione e la raccolta di energia da fonti energetiche meccaniche o ambientali suscitano notevole interesse in svariati campi della tecnologia, ad esempio nel campo degli apparecchi elettronici portatili, o mobili.

Tipicamente, i sistemi di raccolta di energia sono atti a raccogliere ("harvest"), accumulare ("store"), e trasferire energia generata da sorgenti meccaniche o ambientali ad un generico carico di tipo elettrico, che può essere alimentato, o, nel caso di una batteria elettrica, ricaricato. Tali sistemi possono ad esempio consentire di realizzare apparecchi elettronici portatili privi di batteria, o di incrementare notevolmente la durata delle batterie degli stessi apparecchi elettronici portatili.

In particolare, una soluzione di recupero di energia che è stata proposta prevede l'utilizzo di un dispositivo MEMS piezoelettrico, in grado di convertire l'energia associata a vibrazioni meccaniche (provenienti dall'ambiente in cui il dispositivo si trova ad operare o da corpi con cui lo stesso dispositivo si trova a contatto) in energia elettrica.

La soluzione più semplice di dispositivo MEMS piezoelettrico prevede l'impiego di una struttura a trave sospesa (cantilever), che porta ad una estremità libera una massa di prova o massa inerziale (cosiddetta "proof mass"); un opportuno materiale piezoelettrico, quale ad esempio PZT (Piombo-Zirconato di Titanio), è disposto al di sopra della trave.

In tale soluzione, le vibrazioni meccaniche provocano il movimento della massa inerziale e la generazione di

energia cinetica, che viene convertita in energia elastica potenziale sotto forma di deformazione meccanica della trave e dell'associato materiale piezoelettrico.

In particolare, l'oscillazione risultante della trave provoca effetti di tensione e compressione nel materiale piezoelettrico e la risultante generazione di una carica elettrica che può essere rilevata in corrispondenza di elettrodi posti a contatto dello stesso materiale piezoelettrico; in altre parole, parte dell'energia elastica potenziale accumulata nella trave viene trasformata in energia elettrica.

Tale soluzione presenta un importante svantaggio legato ad una banda di frequenza operativa molto stretta, in quanto le strutture a trave vengono generalmente progettate in modo da avere un elevato fattore di qualità Q ; scostamenti anche lievi rispetto alla frequenza naturale di risonanza della struttura meccanica provocano quindi un brusco decadimento dell'energia che può essere recuperata.

Tuttavia, le vibrazioni meccaniche presenti nell'ambiente presentano generalmente un ampio spettro di frequenze, con valori non controllabili. Ne consegue che la soluzione precedentemente descritta non è tipicamente in grado di offrire una adeguata efficienza nel recupero di energia.

Per risolvere tale inconveniente, una ulteriore

soluzione che è stata proposta prevede l'utilizzo di una struttura cosiddetta "a doppio vincolo" ("doubly clamped"), configurata in modo da generare sforzi che risultano in maniera predominante di tipo tensile (di estensione) su relativi elementi piezoelettrici. Tale dispositivo presenta un comportamento dominato dal "bending" lineare nella regione delle alte frequenze e ridotte ampiezze di oscillazione, e dallo "stretching" fortemente non lineare nella regione delle basse frequenze ed elevate ampiezze di oscillazione.

Come mostrato schematicamente in figura 1a, tale soluzione prevede l'utilizzo di una coppia di elementi a trave 1a, 1b, sottili, ovvero aventi uno spessore t lungo un asse verticale z molto minore di una relativa estensione principale (o lunghezza) lungo un primo asse orizzontale x . Gli elementi a trave 1a, 1b sono vincolati in corrispondenza di un primo estremo ad una struttura fissa 2, e in corrispondenza di un secondo estremo ad una massa inerziale 4, che risulta direttamente accoppiata e disposta centralmente rispetto agli stessi elementi a trave 1a, 1b.

In particolare, in figura 1a vengono indicate con D1 e D2 l'estensione principale della massa inerziale 4, e l'estensione totale della struttura (data dell'insieme delle lunghezze degli elementi a trave 1a, 1b e della massa inerziale 4), lungo il primo asse orizzontale x .

Come illustrato in figura 1b, uno spostamento δ lungo l'asse verticale z della massa inerziale 4 per effetto delle vibrazioni meccaniche provoca sforzi di deformazione tensili su entrambi gli elementi a trave 1a, 1b. In particolare, la disposizione centrale della massa inerziale 4 impedisce movimenti laterali o rotazioni della stessa massa inerziale 4, e consente di ridurre la frequenza naturale di oscillazione a valori di centinaia di Hz, assimilabili ai valori tipici dello spettro delle vibrazioni meccaniche ambientali.

Un esempio di dispositivo piezoelettrico MEMS, in particolare un generatore per il recupero di energia, utilizzando la soluzione a doppio vincolo precedentemente discussa, è descritto nel documento:

Hajati Arman, Sang-Gook Kim, "Ultra-wide Bandwidth Piezoelectric Energy Harvesting" Applied Physics Letters 99.8 (2011): 083105, 2011 American Institute of Physics.

In sintesi, e come mostrato in figura 2a, la struttura micromeccanica del dispositivo piezoelettrico MEMS descritto in tale documento, indicata con 10, comprende un corpo di supporto 11, di materiale semiconduttore, in particolare silicio, in cui è realizzata una cavità 12. Una membrana 13 è disposta al di sopra della cavità 12 e porta centralmente una massa inerziale interna 14, direttamente accoppiata alla stessa membrana 13.

La massa inerziale interna 14 definisce nella membrana 13, lateralmente rispetto alla stessa massa inerziale 14, un primo ed un secondo elemento a trave 15a, 15b, al di sopra dei quali è disposto un opportuno elemento di materiale piezoelettrico 16, ad esempio PZT, contattato da elettrodi 17.

Durante il procedimento di fabbricazione, l'attacco che porta alla formazione della cavità 12, definisce anche la geometria della massa inerziale interna 14 e le dimensioni degli elementi a trave 15a, 15b, che risultano dunque determinate in maniera diretta dalla dimensione della stessa massa inerziale interna 14.

In particolare, in figura 2a, vengono nuovamente indicate con D1 e D2 rispettivamente l'estensione della massa inerziale interna 14 e l'estensione principale complessiva degli elementi a trave 15a, 15b e della stessa massa inerziale interna 14.

La struttura micromeccanica 10 comprende inoltre una massa inerziale esterna 18, avente estensione corrispondente sostanzialmente alla suddetta dimensione D2, accoppiata, ad esempio con tecniche di bonding, al di sopra della membrana 13.

In uso, in presenza di vibrazioni ambientali, gli elementi a trave 15a, 15b si deformano per effetto dello spostamento congiunto delle masse inerziali interna ed

esterna 14, 18, generando così un corrispondente segnale elettrico in corrispondenza degli elettrodi 17.

Come mostrato in figura 2b (in cui, per semplicità non vengono illustrate le masse inerziali esterne 18), possono vantaggiosamente essere realizzate a partire da uno stesso corpo di supporto 11 una pluralità di strutture micromeccaniche 10 del tipo descritto in precedenza, in modo da incrementare le prestazioni di generazione di energia elettrica.

La presente Richiedente ha verificato che anche la soluzione precedentemente descritta risente tuttavia di alcune importanti limitazioni.

In particolare, le prestazioni elettriche sono dipendenti dalla geometria della risultante massa inerziale.

Tuttavia, non è possibile incrementare le dimensioni della massa inerziale interna 14 oltre una certa soglia, in quanto si ridurrebbero in tal caso eccessivamente le dimensioni degli elementi a trave 15a, 15b (e del relativo elemento di materiale piezoelettrico 16); tipicamente, nella struttura micromeccanica 10, la dimensione D1 può essere al più pari ad un terzo della dimensione D2.

L'introduzione della massa inerziale esterna 18 è pertanto richiesta per incrementare le prestazioni di generazione di energia a partire dalle vibrazioni

meccaniche rilevate.

Tuttavia, l'accoppiamento di tale massa inerziale esterna 18 complica il processo di fabbricazione (richiedendo infatti l'accoppiamento tra due fette distinte di materiale semiconduttore, cosiddetto "wafer-to-wafer bonding") e comporta una non trascurabile possibilità di difettosità in seguito al taglio delle stesse fette.

Inoltre, la geometria della struttura piezoelettrica è in tal caso fissa, essendo del tipo a doppio vincolo basata sui modi di deformazione tensile del materiale piezoelettrico, limitando dunque le possibilità nella progettazione delle caratteristiche della struttura micromeccanica.

Scopo della presente invenzione è quello di risolvere, almeno in parte, le problematiche che affliggono i dispositivi piezoelettrici MEMS di tipo noto, ed in particolare di fornire una soluzione più efficiente per il recupero di energia ambientale.

Secondo la presente invenzione vengono pertanto forniti un dispositivo piezoelettrico MEMS ed un relativo procedimento di fabbricazione, 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 e con

riferimento ai disegni allegati, nei quali:

- le figure 1a e 1b sono viste in sezione schematiche di una struttura piezoelettrica MEMS, in differenti condizioni operative;

- la figura 2a è una vista in sezione schematica di una porzione di una struttura micromeccanica di un dispositivo piezoelettrico MEMS di tipo noto;

- la figura 2b è una vista dall'alto schematica della struttura micromeccanica di figura 2a;

- la figura 3a è una vista in sezione di una struttura micromeccanica di un dispositivo piezoelettrico MEMS secondo una forma di realizzazione della presente soluzione;

- la figura 3b è una vista prospettica dall'alto schematica della struttura micromeccanica di figura 3a;

- la figura 4 è una vista in sezione schematica di una porzione della struttura micromeccanica di figura 3a;

- le figure 5, 6a-6b, 7, 8a-8c, 9-14 e 15 sono viste schematiche, in sezione o in pianta, della struttura micromeccanica di figura 3a in successive fasi di un relativo procedimento di fabbricazione;

- le figure 16 e 17a sono viste prospettiche dall'alto schematiche relative a differenti forme di realizzazione della struttura micromeccanica;

- la figura 17b è una vista prospettica dal basso

schematica della struttura micromeccanica di figura 17a;

- le figure 18 e 19 sono viste in pianta schematiche relative ad ulteriori forme di realizzazione della struttura micromeccanica;

- la figura 20 è uno schema a blocchi di un sistema di recupero di energia elettrica utilizzando il dispositivo piezoelettrico MEMS come micro-generatore di energia; e

- la figura 21 mostra un apparecchio elettronico portatile in cui può essere utilizzato il sistema di recupero di energia elettrica di figura 20.

Come illustrato nelle figure 3a e 3b, secondo una forma di realizzazione della presente soluzione, un dispositivo piezoelettrico MEMS 20 comprende un corpo monolitico 21 di materiale semiconduttore, in particolare silicio, avente una superficie anteriore 21a ed una superficie posteriore 21b che giacciono in un piano orizzontale xy definito da un primo e da un secondo asse orizzontale x, y.

Il corpo monolitico 21 presenta centralmente una cavità di alloggiamento 22, che si estende a partire dalla superficie posteriore 21b fino a raggiungere una membrana 23, che risulta sospesa al di sopra della cavità di alloggiamento 22 in corrispondenza della superficie anteriore 21a del corpo monolitico 21; in pianta, la membrana 23 e la sottostante cavità di alloggiamento 22

possono ad esempio avere una forma circolare, quadrata, rettangolare, o genericamente poligonale.

Il dispositivo piezoelettrico MEMS 20 comprende inoltre una massa inerziale 24, disposta all'interno della cavità di alloggiamento 22 ed accoppiata alla membrana 23 mediante un elemento di collegamento, o supporto 25; tale elemento di collegamento 25 risulta interposto tra una superficie superiore 24a della massa inerziale 24 ed una superficie inferiore 23b, ad essa affacciata, della membrana 23.

In una forma di realizzazione, l'elemento di collegamento 25 presenta una conformazione a colonna ed è collegato alla membrana 23 in corrispondenza di un suo centro geometrico.

La cavità di alloggiamento 22 circonda la massa inerziale 24 lateralmente (lungo il primo ed il secondo asse orizzontale x, y) e superiormente (una porzione della stessa cavità di alloggiamento 22 è infatti interposta tra la superficie anteriore 24a della massa inerziale 24 e la membrana 23); la stessa massa inerziale 24 presenta una superficie posteriore 24b disposta, nella forma di realizzazione illustrata, allo stesso livello della superficie posteriore 21b del corpo monolitico 21.

In particolare, si veda anche la rappresentazione schematica di figura 4, viene nuovamente indicata con D1

un'estensione laterale della massa inerziale 24 (parallelamente alla superficie anteriore 21a del corpo monolitico 21 nel piano orizzontale xy, ad esempio lungo il primo asse orizzontale x), e con D2 una corrispondente estensione principale della membrana 23 lungo lo stesso primo asse orizzontale x.

Secondo un aspetto della presente soluzione, come risulta evidente dall'esame della figura 3a ed inoltre della figura 4, il dimensionamento della massa inerziale 24 risulta in tal caso svincolato e indipendente dal dimensionamento della membrana 23, destinata, come descritto in seguito, a portare elementi di rilevamento piezoelettrico delle deformazioni; la dimensione D1 può in tal caso arrivare ad essere vantaggiosamente all'incirca pari alla dimensione D2.

Inoltre, una corrispondente dimensione dell'elemento di collegamento 25 (in questo caso lungo il primo asse orizzontale x), indicata con D3, è inferiore alla dimensione D1 della massa inerziale 24 (ad esempio molto inferiore, nell'esempio illustrato). In altre parole, soltanto una porzione centrale della massa inerziale 24, con estensione molto minore dell'intera estensione laterale D1 della stessa massa inerziale 24 lungo il primo asse orizzontale x, risulta collegata alla membrana 23 tramite l'elemento di collegamento 25.

Il dispositivo piezoelettrico MEMS 20 comprende inoltre, al di sopra della superficie anteriore 21a del corpo monolitico 21 ed in generale in corrispondenza superiormente della membrana 23:

un primo strato dielettrico 27, ad esempio di ossido, disposto sulla superficie anteriore 21a del corpo monolitico 21;

uno strato di servizio 28, ad esempio di polisilicio, il cui utilizzo sarà chiarito in seguito con riferimento al procedimento di fabbricazione (successiva figura 10);

un secondo strato dielettrico 29, ad esempio anch'esso di ossido, disposto al di sopra dello strato di servizio 28 e del primo strato dielettrico 27;

uno strato di materiale piezoelettrico 30, ad esempio PZT, disposto sopra il secondo strato dielettrico 29, verticalmente in corrispondenza della membrana 23;

una disposizione (arrangement) di elettrodi 32, disposta al di sopra, e a contatto, dello strato di materiale piezoelettrico 30; in particolare, la disposizione di elettrodi 32 comprende almeno un primo gruppo di elettrodi 33a ed un secondo gruppo di elettrodi 33b, disposti al di sopra della membrana 23, da parte opposta rispetto all'elemento di collegamento 25 nel piano orizzontale xy, ad esempio da parte opposta lungo il primo asse orizzontale x, ed atti a consentire il rilevamento

delle deformazioni della stessa membrana 23;

uno strato di passivazione 35, ad esempio di ossido o nitruro di silicio, disposto al di sopra della disposizione di elettrodi 32, dello strato di materiale piezoelettrico 30 e del secondo strato dielettrico 29; ed

elementi di contatto elettrico 36 (cosiddette "vias"), disposti al di sopra dello strato di passivazione 35, ed estendentisi inoltre, almeno in parte, attraverso lo stesso strato di passivazione 35, per contattare elettricamente la disposizione di elettrodi 32 ed in particolare rispettivamente il primo ed il secondo gruppo di elettrodi 33a, 33b e consentire in tal modo il rilevamento di un segnale elettrico e l'esecuzione (come meglio descritto in seguito), ad esempio di operazioni di recupero di energia.

In uso, la massa inerziale 24 si sposta in risposta alle vibrazioni meccaniche, in tal modo causando la deformazione della membrana 23 e dell'associato strato di materiale piezoelettrico 30. Tale deformazione viene rilevata mediante il primo ed il secondo gruppo di elettrodi 33a, 33b, che forniscono, attraverso i contatti elettrici 36 rispettivi segnali elettrici per la generazione di energia elettrica a partire dalle suddette vibrazioni.

Come illustrato nella vista di figura 3b, può essere prevista, lateralmente alla membrana 23 ed alla massa

inerziale 24, un'apertura di rilascio 38, nell'esempio avente porzioni di apertura estendentisi lungo il primo asse orizzontale x e disposte lateralmente alla massa inerziale 24 rispetto all'asse orizzontale y . Come sarà meglio discusso in seguito, tale apertura di rilascio 38 definisce la modalità di vincolo della membrana 23 al corpo monolitico 21, nell'esempio essendo del tipo a doppio vincolo (dato che la stessa membrana 23 è accoppiata al corpo monolitico 21 in corrispondenza di due suoi lati estendentisi lungo il secondo asse orizzontale y).

Inoltre, in maniera qui non illustrata (ma che risulterà evidente ad un esperto del settore), un corpo di supporto può essere accoppiato inferiormente al corpo monolitico 21, in corrispondenza della superficie posteriore 21b, con funzioni di supporto (il corpo di supporto avendo in tal caso una opportuna cavità in comunicazione fluidica con la cavità di alloggiamento 22, in modo da fornire libertà di movimento alla massa inerziale 24).

Viene ora descritto un possibile procedimento di fabbricazione per la realizzazione del dispositivo piezoelettrico MEMS 20.

In una fase iniziale del processo di fabbricazione, si veda la figura 5, viene predisposta una fetta 41 di materiale semiconduttore, ad esempio silicio

monocristallino, comprendente un substrato 42, ad esempio di tipo N, ed avente una superficie anteriore 41a ed una superficie posteriore 41b.

Il procedimento di fabbricazione prosegue con la formazione di una cavità sepolta all'interno della fetta 41, con tecniche descritte in dettaglio ad esempio in EP 1 577 656 B1, a nome della stessa Richiedente.

In sintesi, e come mostrato nelle figure 6a e 6b (non in scala, così come le restanti figure), sulla superficie anteriore 41a della fetta 41 viene realizzata una maschera 43 di resist. La maschera 43 presenta in particolare (si faccia riferimento alla figura 6b) un'area di attacco 44, nell'esempio approssimativamente quadrata (ma può essere analogamente circolare o genericamente poligonale), e comprende una pluralità di porzioni di maschera 43a, ad esempio esagonali, che definiscono un reticolo, ad esempio a nido d'ape.

Come sarà evidente in seguito, l'area di attacco 44 della maschera 43 corrisponde all'area che sarà occupata dalla cavità di alloggiamento 22 e presenta un'estensione corrispondente all'estensione della membrana 23 (l'estensione laterale della maschera 43 è dunque sostanzialmente pari alla dimensione D2, lungo il primo asse orizzontale x).

La maschera 43 presenta una porzione centrale 43', ad

esempio avente forma quadrata o circolare o genericamente poligonale in pianta, che corrisponde al posizionamento dell'elemento di collegamento 25, nell'esempio anch'esso con conformazione quadrata o circolare o genericamente poligonale in pianta. In particolare, l'estensione laterale della porzione centrale 43' dalla maschera 43 determina l'estensione D3 dell'elemento di collegamento 25, lungo il primo asse orizzontale x.

Inoltre, la maschera 43 presenta un prolungamento laterale 45, disposto in corrispondenza di un asse centrale della stessa maschera 43 ed avente estensione nell'esempio lungo il secondo asse orizzontale y.

Quindi (si faccia riferimento alla figura 7, che, come la figura 6a, rappresenta soltanto una piccola porzione ingrandita della fetta 41, per ragioni di chiarezza di illustrazione), utilizzando la maschera 43 viene eseguito un attacco chimico anisotropo del substrato 42, in seguito al quale vengono formate trincee 46, comunicanti tra loro e delimitanti una pluralità di colonne 47 di silicio. In pratica, le trincee 46 formano una regione aperta di forma complessa (corrispondente al reticolo della maschera 43) nella quale si estendono le colonne 47 (di forma corrispondente alle porzioni di maschera 43a).

Successivamente, figura 8a (che raffigura una porzione più estesa della fetta 41, rispetto alle figure 6a e 7), la

maschera 43 viene rimossa e viene eseguita una crescita epitassiale in ambiente deossidante (tipicamente, in atmosfera con elevata concentrazione di idrogeno, preferibilmente con triclorosilano-SiHCl₃). Di conseguenza, uno strato epitassiale 48 (indicato solo in figura 8a e in seguito non distinto dal substrato 42) cresce al di sopra delle colonne 47 e chiude superiormente la suddetta regione aperta formata dalle trincee 46.

Viene quindi eseguita una fase di annealing termico, ad esempio per 30 minuti a 1190°C, preferibilmente in atmosfera riducente, tipicamente di idrogeno.

La fase di annealing provoca una migrazione degli atomi di silicio che tendono a portarsi in una posizione di minore energia. Di conseguenza, e anche grazie alla distanza ravvicinata fra le colonne 47, gli atomi di silicio migrano completamente dalle porzioni delle colonne 47 presenti all'interno della suddetta regione formata dalle trincee 46, e si forma, a partire da tale regione, una cavità sepolta 50.

Al di sopra della cavità sepolta 50 rimane un sottile strato di silicio, costituito in parte da atomi di silicio cresciuti epitassialmente ed in parte da atomi di silicio migrati, che forma la membrana 23, flessibile e che può deflettersi in presenza di sollecitazioni esterne.

Durante la stessa fase del procedimento di

fabbricazione, viene definito l'elemento di collegamento 25 all'interno della cavità sepolta 50, che si estende in particolare centralmente rispetto alla membrana 23, tra una superficie interna superiore 50a ed una superficie interna inferiore 50b della stessa cavità sepolta 50.

Inoltre, come mostrato nella differente sezione di figura 8b e nella corrispondente vista in pianta di figura 8c (in cui sono evidenziate le linee di sezione relative alle suddette figure 8a e 8b), tramite le stesse fasi del procedimento di fabbricazione viene realizzato, nella regione individuata dal prolungamento laterale 45 della maschera 43, un canale sepolto 51, comunicante con la cavità sepolta 50, lateralmente rispetto alla stessa cavità sepolta 50 (nell'esempio con estensione lungo il secondo asse orizzontale y).

Una trincea di accesso 54 viene quindi formata attraverso una porzione superficiale del substrato 42, per raggiungere il canale sepolto 51, tramite un attacco dal fronte della fetta 41, a partire dalla superficie anteriore 41a.

Il procedimento di fabbricazione procede dunque, figura 9, con una fase di ossidazione termica all'interno della cavità sepolta 50 (attraverso la trincea di accesso 54) ed al di sopra della superficie anteriore 41a della fetta 41, formando il primo strato dielettrico 27, ad

esempio di ossido di silicio, SiO_2 . In seguito a questa fase, si crea in particolare una regione dielettrica interna 55a, che ricopre le pareti interne della cavità sepolta 50 e le pareti interne della trincea di accesso 54.

Viene quindi eseguita, figura 10, una fase di deposizione, ad esempio di polisilicio, che porta alla formazione dello strato di servizio 28 al di sopra della fetta 41 ed all'interno della trincea di accesso 54, a chiusura dell'apertura precedentemente realizzata per l'ossidazione.

Il procedimento di fabbricazione prevede a questo punto, figura 11, la formazione del secondo strato dielettrico 29, al di sopra dello strato di servizio 28, e quindi la formazione, per deposizione e successiva definizione, dello strato di materiale piezoelettrico 30, al di sopra del secondo strato dielettrico 29, figura 12.

In particolare, lo strato di materiale piezoelettrico 30 può essere formato mediante la tecnica nota come "sol-gel", che prevede fasi successive di formazione di una soluzione colloidale (sol) che funge da precursore per la successiva formazione di un reticolo inorganico continuo contenente una fase liquida interconnessa (gel) attraverso reazioni di idrolisi e condensazione. Post-trattamenti termici di essiccamento e solidificazione vengono generalmente impiegati per eliminare la fase liquida dal

gel, promuovere ulteriore condensazione, contribuire alla formazione della corretta fase cristallografica, incrementare le proprietà meccaniche e, di conseguenza, piezoelettriche.

Lo strato di materiale piezoelettrico 30 viene in seguito definito in modo da presentare una estensione principale laterale, lungo il primo asse orizzontale x, superiore alla dimensione D2 dell'intera membrana 23, come mostrato nella stessa figura 12.

Il procedimento di fabbricazione prosegue quindi con la deposizione, al di sopra dello strato di materiale piezoelettrico 30, di uno strato di elettrodo, ad esempio di titanio/tungsteno (TiW), che viene quindi opportunamente sagomato, come è stato descritto in dettaglio in precedenza, con riferimento alla figura 3a, per la formazione della disposizione di elettrodi 32.

Viene quindi deposto lo strato di passivazione 35, al di sopra della disposizione di elettrodi 32 precedentemente realizzata, e vengono formate, figura 13, attraverso lo stesso strato di passivazione 35, aperture di contatto, che vengono successivamente riempite con un opportuno materiale conduttore, per la formazione degli elementi di contatto elettrico 36.

Secondo un aspetto della presente soluzione, viene quindi formata, si veda la stessa figura 13, una maschera

di attacco 61, sulla superficie posteriore 41b della fetta 41, per l'attacco della stessa fetta 41 e la formazione di trincee dal retro 62 che raggiungono la cavità sepolta 50; in particolare, tale attacco viene eseguito con arresto sulla regione dielettrica 55a, che riveste una parete di fondo della stessa cavità sepolta 50.

In questa fase del procedimento di fabbricazione viene determinata l'estensione D1 della massa inerziale 25, in funzione del posizionamento e delle dimensioni delle trincee dal retro 62; in particolare, le trincee dal retro 62 presentano in sezione una parete laterale esterna verticalmente in corrispondenza del perimetro della cavità sepolta 50, ed una parete laterale interna la cui posizione definisce la suddetta dimensione D1.

Appare dunque evidente come, nella soluzione descritta, sia possibile dimensionare in maniera desiderata la massa inerziale 25 in questa fase di attacco dal retro della fetta 41, in maniera distinta e disaccoppiata dalle fasi di formazione e dimensionamento della membrana 23 (che sono state eseguite in precedenza).

Il procedimento di fabbricazione prosegue, figura 14, con l'attacco della regione dielettrica 55a all'interno della cavità sepolta 50, in tal modo definendo interamente la cavità di alloggiamento 22 all'interno della fetta 41.

Secondo un ulteriore aspetto della presente soluzione,

in una fase finale del procedimento di fabbricazione, può essere definita la tipologia di vincolo della membrana 23 alla fetta 41 (o, in maniera analoga, al corpo monolitico 21 che si otterrà in seguito al taglio finale, o singolazione, della stessa fetta 41); a questo riguardo, la soluzione proposta consente vantaggiosamente una ampia libertà di progetto, in modo da adattarsi a varie esigenze ed applicazioni, ad esempio con possibilità di ottenere una soluzione di tipo a doppio vincolo, a vincolo completo o a quattro punti di vincolo.

In dettaglio, come mostrato in figura 15 (a cui corrisponde la vista in pianta prospettica di figura 3b precedentemente introdotta), può quindi venire eseguito un ulteriore attacco della fetta 41 (in questo caso in cui la forma di realizzazione prevede un doppio vincolo), ad esempio dal retro a partire dalla superficie posteriore 41b.

Tale attacco, eseguito attraverso la cavità di alloggiamento 22, coinvolge una porzione di bordo della membrana 23 e gli strati eventualmente presenti al di sopra della superficie anteriore 41a della fetta 41, nel presente caso il primo strato dielettrico 27, lo strato di servizio 28 ed eventualmente il secondo strato dielettrico 29.

In particolare, viene creata l'apertura di rilascio 38, in comunicazione fluidica con la cavità di

alloggiamento 22, comprendente in questo caso (che si riferisce nuovamente alla forma di realizzazione che prevede un doppio vincolo) una prima porzione di cavità 38a ed una seconda porzione di cavità 38b disposte lateralmente alla membrana 23 da parti opposte rispetto al secondo asse orizzontale y , e separanti la stessa membrana 23 dal materiale semiconduttore della fetta 41.

La membrana 23 risulta, in questa forma di realizzazione, collegata alla fetta 41 in corrispondenza di due lati, ad esempio i lati paralleli al primo asse orizzontale x , e separata dalla stessa fetta 41 lungo gli altri due lati, nell'esempio i lati paralleli al secondo asse orizzontale y .

Come mostrato in figura 16, una differente forma di realizzazione, che presenta un vincolo di tipo a quattro punti della membrana 23 alla fetta 41, prevede la realizzazione, mediante l'attacco precedentemente descritto, di ulteriori due porzioni di cavità 38c, 38d della cavità di rilascio 38, disposte lungo i lati della stessa membrana 23 paralleli al secondo asse orizzontale y , lateralmente da parti opposte della membrana 23 rispetto al primo asse orizzontale x .

La membrana 23 risulta dunque in tal caso collegata e vincolata alla fetta 41 in corrispondenza di quattro suoi vertici (avendo nell'esempio una forma sostanzialmente

quadrata), mediante porzioni di collegamento 66a-66d che si estendono in corrispondenza di tali vertici, tra la membrana 23 e la fetta 41 (come illustrato nella suddetta figura 16).

Nelle figure 17a-17b è invece illustrata una forma di realizzazione con vincolo completo, in cui la membrana 23 è collegata alla fetta 41 lungo l'intero suo perimetro (in questo caso, può dunque non essere realizzata l'ultima fase di attacco, discussa in precedenza, per la formazione della cavità di rilascio 38, qui non presente).

In ogni caso, il procedimento di fabbricazione termina mediante una fase di taglio "cosiddetta sawing" della fetta 41, per la definizione delle piastrine (die), ciascuna comprendente il corpo di materiale semiconduttore 21 e la relativa struttura piezoelettrica.

Come illustrato nelle figure 18 e 19, che si riferiscono a solo titolo di esempio ad una struttura a quattro elementi di vincolo, una ulteriore possibilità offerta dalla presente soluzione riguarda la realizzazione della disposizione di elettrodi 32.

In particolare, come mostrato in figura 18, in una possibile forma di realizzazione, sia il primo gruppo di elettrodi 33a sia il secondo gruppo di elettrodi 33b presentano una configurazione interdigitata, ovvero comprendendo ciascuno un primo ed un secondo "pettine" di

elettrodi, contattati elettricamente da un rispettivo elemento di contatto 36 (in questo caso disposti in corrispondenza dei quattro punti di vincolo).

In alternativa, come mostrato in figura 19, la disposizione di elettrodi 32 può essere di tipo circolare; in questo caso, il primo ed il secondo gruppo di elettrodi 33a, 33b comprendono una rispettiva pluralità di anelli di elettrodo a diametro crescente che si dipartono concentrici da un rispettivo elemento di raccordo 69 che termina in corrispondenza di un rispettivo elemento di contatto 36 (gli elementi di contatto 36 essendo in tal caso disposti in corrispondenza di due punti di vincolo diametralmente opposti).

I vantaggi della soluzione descritta emergono in maniera evidente dalla discussione precedente.

Si sottolinea comunque il fatto che essa consente di risolvere i problemi evidenziati in precedenza che affliggono le soluzioni di dispositivi piezoelettrici MEMS di tipo noto, in particolare: utilizzando tecnologie e processi del tutto compatibili con le tecnologie dei dispositivi MEMS; presentando costi di fabbricazione e utilizzando processi standard di fabbricazione, con una risultante ridotta occupazione di area in realizzazione integrata (e la possibilità di integrazione con ulteriori strutture micromeccaniche, o circuiti integrati ASIC);

offrendo una ampia libertà di progettazione della massa inerziale 25, che può in particolare avere dimensioni confrontabili con la relativa membrana 23, tanto da non richiedere la presenza di una massa inerziale esterna, aggiuntiva (in tal modo comportando una ulteriore riduzione della complessità di realizzazione ed un marcato decremento della difettosità e dei costi); in generale garantendo migliorate prestazioni elettriche, in particolare per quanto riguarda l'efficienza nella generazione di energia elettrica a partire dalle vibrazioni meccaniche.

Le suddette caratteristiche rendono particolarmente vantaggioso l'utilizzo del dispositivo piezoelettrico MEMS 20 in un sistema di recupero di energia elettrica, per l'utilizzo ad esempio in un apparecchio elettronico portatile (quale uno smartphone), ad esempio del tipo raffigurato schematicamente e mediante blocchi funzionali in figura 20.

In particolare, il sistema di recupero di energia, indicato nel suo insieme con 70, comprende il dispositivo piezoelettrico MEMS 20, utilizzato come trasduttore per la conversione di vibrazioni ambientali in energia elettrica, generando un segnale di trasduzione S_{TRASD} .

Il sistema di recupero di energia 70 comprende inoltre: un'interfaccia elettrica di raccolta 71, configurata per ricevere in ingresso il segnale di

trasduzione S_{TRASP} , elaborare in maniera opportuna lo stesso segnale, e fornire in uscita un segnale di raccolta S_M ; un condensatore di accumulo 72, collegato all'uscita dell'interfaccia di raccolta 71 e ricevente il segnale di raccolta S_M , che ne determina la carica ed il conseguente immagazzinamento di energia; ed un regolatore, o convertitore, di tensione 74, collegato al condensatore di accumulo 72 per ricevere in ingresso l'energia elettrica immagazzinata e generare in uscita un segnale regolato S_{REG} , con valore opportuno per essere fornito ad un carico elettrico 75, per la sua alimentazione o ricarica.

Come precedentemente indicato, il sistema di raccolta di energia 70 può vantaggiosamente essere utilizzato per fornire l'alimentazione elettrica di un apparecchio elettrico o elettronico, che può al limite essere privo di batteria o dotato di una batteria ricaricabile.

A titolo di esempio, la figura 21 mostra un apparecchio elettronico 76, nell'esempio di tipo portatile, quale un braccialetto, o orologio, indossabile, che incorpora il sistema di raccolta di energia 70, per la generazione di energia elettrica sfruttando le vibrazioni meccaniche, in questo caso originate dal movimento del corpo dell'utilizzatore. L'apparecchio elettronico 76 può vantaggiosamente essere utilizzato nel campo del fitness.

Risulta infine chiaro che a quanto qui descritto ed

illustrato possono essere apportate modifiche e varianti senza per questo uscire dall'ambito di protezione della presente invenzione, come definito nelle rivendicazioni allegate.

In particolare, possono essere apportate modifiche di forma o dimensioni in uno o più degli elementi che costituiscono il dispositivo piezoelettrico MEMS 20; ad esempio, a seconda delle esigenze applicative e di design del dispositivo piezoelettrico MEMS 20, l'elemento di collegamento centrale 25 potrebbe avere una differente forma o una differente estensione (nei limiti delle dimensioni della massa inerziale 24), ad esempio avendo una estensione allungata lungo il secondo asse orizzontale y, che può essere sostanzialmente pari alla corrispondente estensione lungo lo stesso secondo asse orizzontale y della membrana 23.

Inoltre, la struttura micromeccanica precedentemente descritta può in generale essere utilizzata in un qualsiasi dispositivo MEMS, per generare un segnale elettrico a partire da vibrazioni meccaniche rilevate, ad esempio in un accelerometro piezoelettrico o in altri dispositivi che prevedano l'utilizzo di una massa inerziale.

RIVENDICAZIONI

1. Dispositivo piezoelettrico MEMS (20) comprendente:

un corpo monolitico (21) di materiale semiconduttore, avente una prima superficie principale (21a) ed una seconda superficie principale (21b), parallele ad un piano orizzontale (xy) formato da un primo (x) e da un secondo (y) asse orizzontale ed opposte tra loro lungo un asse verticale (z);

una cavità di alloggiamento (22), disposta all'interno di detto corpo monolitico (21);

una membrana (23) sospesa al di sopra di detta cavità di alloggiamento (22), in corrispondenza della prima superficie principale (21a) di detto corpo monolitico (21);

uno strato di materiale piezoelettrico (30) disposto al di sopra di una prima superficie (23a) di detta membrana (23);

una disposizione di elettrodi (32), disposta a contatto dello strato di materiale piezoelettrico (30); ed

una massa inerziale (24) accoppiata ad una seconda superficie (23b), opposta alla prima superficie (23a) lungo l'asse verticale (z), della membrana (23) ed atta a provocarne la deformazione in risposta a vibrazioni meccaniche,

caratterizzato dal fatto che detta massa inerziale (24) è accoppiata a detta membrana (23) mediante un elemento di collegamento (25) interposto, in posizione centrale, tra detta membrana (23) e detta massa inerziale (24) nella direzione di detto asse verticale (z).

2. Dispositivo secondo la rivendicazione 1, in cui detta cavità di alloggiamento (22) è interposta tra una prima superficie (24a) di detta massa inerziale (24), affacciata a detta membrana (23), e la seconda superficie inferiore (23b) di detta membrana (23), e circonda lateralmente detto elemento di collegamento (25) parallelamente a detto piano orizzontale (xy).

3. Dispositivo secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui detto elemento di collegamento (25) presenta una conformazione a colonna ed è disposto in corrispondenza di un centro geometrico di detta membrana (23).

4. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detta membrana (23) presenta una estensione (D2) lungo il primo asse orizzontale (x), detta massa inerziale (24) presenta una rispettiva estensione (D1) lungo detto primo asse orizzontale (x), minore della estensione (D2) di detta membrana (23), e detto elemento di collegamento (25) presenta una rispettiva estensione (D3) lungo detto primo asse orizzontale (x), minore della rispettiva estensione (D1) di detta massa inerziale (24).

5. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre una apertura di rilascio (38), in comunicazione fluidica con la cavità di alloggiamento (22), disposta lateralmente alla membrana (23), e separante detta membrana (23) da detto corpo monolitico (21) in

corrispondenza di detta prima superficie principale (21a).

6. Dispositivo secondo la rivendicazione 5, in cui detta apertura di rilascio (38) è atta a definire una tipologia di vincolo di detta membrana (23) a detto corpo monolitico (21).

7. Dispositivo secondo la rivendicazione 6, in cui detta tipologia di vincolo è un vincolo doppio e detta apertura di rilascio (38) comprende una prima (38a) ed una seconda (38b) porzione di apertura estendentisi lateralmente a detta membrana (23) da parti opposte lungo detto secondo asse orizzontale (y); o un vincolo a quattro punti, e detta apertura di rilascio (38) comprende inoltre una terza (38c) ed una quarta (38d) porzione di apertura estendentisi lateralmente a detta membrana (23) da parti opposte lungo detto primo asse orizzontale (x).

8. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1-4, in cui detta membrana (23) è completamente vincolata a detto corpo monolitico (21), essendo a contatto di detto corpo monolitico (21) lungo un suo intero perimetro.

9. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detta disposizione di elettrodo (32) comprende almeno un primo (33a) ed un secondo (33b) gruppo di elettrodi, disposti lateralmente rispetto a detto elemento di collegamento (25) ed aventi una configurazione interdigitata, o circolare.

10. Sistema di recupero di energia (70), comprendente il

dispositivo piezoelettrico MEMS (20) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, avente funzione di trasduzione dell'energia meccanica associata alle vibrazioni meccaniche in un segnale elettrico (S_{MEMS}).

11. Apparecchio elettronico (76), di tipo portatile o mobile, dotato del sistema di recupero di energia (70) secondo la rivendicazione 10.

12. Procedimento di fabbricazione di un dispositivo piezoelettrico MEMS (20) comprendente:

predisporre una fetta (41) di materiale semiconduttore, avente una prima superficie principale (41a) ed una seconda superficie principale (41b), parallele ad un piano orizzontale (xy) formato da un primo (x) e da un secondo (y) asse orizzontale ed opposte tra loro lungo un asse verticale (z);

formare una membrana (23), in corrispondenza della prima superficie principale (41a) di detta fetta (41);

formare una cavità di alloggiamento (22), all'interno di detta fetta (41), in modo tale che detta membrana (23) sia sospesa al di sopra di detta cavità di alloggiamento (22);

formare uno strato di materiale piezoelettrico (30) al di sopra di una prima superficie (23a) di detta membrana (23);

formare una disposizione di elettrodi (32), a contatto dello strato di materiale piezoelettrico (30); e

formare una massa inerziale (24) accoppiata ad una seconda superficie (23b), opposta alla prima superficie (23a)

lungo l'asse verticale (z), della membrana (23) ed atta a provocarne la deformazione in risposta a vibrazioni meccaniche ambientali,

caratterizzato dal fatto che detta fase di formare una massa inerziale (24) comprende formare detta massa inerziale (24) in modo tale che sia accoppiata a detta membrana (23) mediante un elemento di collegamento (25) interposto, in posizione centrale, tra detta membrana (23) e detta massa inerziale (24) nella direzione di detto asse verticale (z).

13. Procedimento secondo la rivendicazione 12, in cui detta fase di formare una membrana (23) comprende formare una cavità sepolta (50) all'interno di detta fetta (41), detta membrana (23) essendo sospesa al di sopra di detta cavità sepolta (50), interposta tra una prima superficie interna (50a) di detta cavità sepolta (50) e detta prima superficie principale (41a) di detta fetta (41); in cui detta fase di formare una cavità sepolta (50) comprende definire geometria e dimensione di detta membrana (23) ed inoltre di detto elemento di collegamento (25) disposto centralmente rispetto a detta membrana (23) tra la prima superficie interna (50a) ed una seconda superficie interna (50b), opposta alla prima superficie interna (50a) lungo detto asse verticale (z), di detta cavità sepolta (50).

14. Procedimento secondo la rivendicazione 13, in cui detta fase di formare una cavità di alloggiamento (22)

comprende, in seguito a detta fase di formare una cavità sepolta (50), eseguire un attacco di detta fetta (41) a partire da detta seconda superficie principale (41b), in modo tale da raggiungere detta cavità sepolta (50); in cui detta fase di eseguire un attacco comprende formare detta massa inerziale (24) e definire geometria e dimensione di detta massa inerziale (24).

15. Procedimento secondo la rivendicazione 14, in cui la fase di formare una cavità sepolta (50) comprende definire una estensione (D2) di detta membrana (23) ed una rispettiva estensione (D3) di detto elemento di collegamento (25) lungo detto primo asse orizzontale (x), e la successiva fase di eseguire un attacco comprende la fase di definire una rispettiva estensione (D1) di detta massa inerziale (24) lungo detto primo asse orizzontale (x), la rispettiva estensione (D1) della massa inerziale (24) essendo minore dell'estensione (D2) della membrana (23) e maggiore della rispettiva estensione (D3) dell'elemento di collegamento (25).

16. Procedimento secondo la rivendicazione 14 o 15, comprendente inoltre la fase di formare un'apertura di rilascio (38), in comunicazione fluidica con la cavità di alloggiamento (22), disposta lateralmente alla membrana (23), e separante detta membrana (23) da detta fetta (41) in corrispondenza di detta prima superficie principale (41a); in cui formare un'apertura di rilascio (38) comprende definire

una tipologia di vincolo di detta membrana (23) a detta fetta (41).

17. Procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 14-16, in cui detta fase di formare una cavità sepolta (50) comprende le fasi di:

formare una maschera di attacco (43) al di sopra della prima superficie principale (41a) di detta fetta (41), la geometria di detta maschera di attacco (43) essendo atta a definire geometria e dimensioni di detta membrana (23) e di detto elemento di collegamento centrale (25), e detta maschera di attacco (43) comprendendo un reticolo di porzioni di maschera (43a);

scavare, attraverso detta maschera di attacco (43) trincee (46) all'interno di detta fetta (41) delimitanti fra loro pareti (47) di materiale semiconduttore;

crescere epitassialmente, a partire da dette pareti (47), uno strato di chiusura (48) di materiale semiconduttore, detto strato di chiusura chiudendo superiormente dette trincee (46) e consentendo la formazione di detta membrana (23); ed

eseguire un trattamento termico tale da causare la migrazione del materiale semiconduttore delle pareti (47) e formare la cavità sepolta (50), contestualmente definendo detti elemento di collegamento (25) e membrana (23).

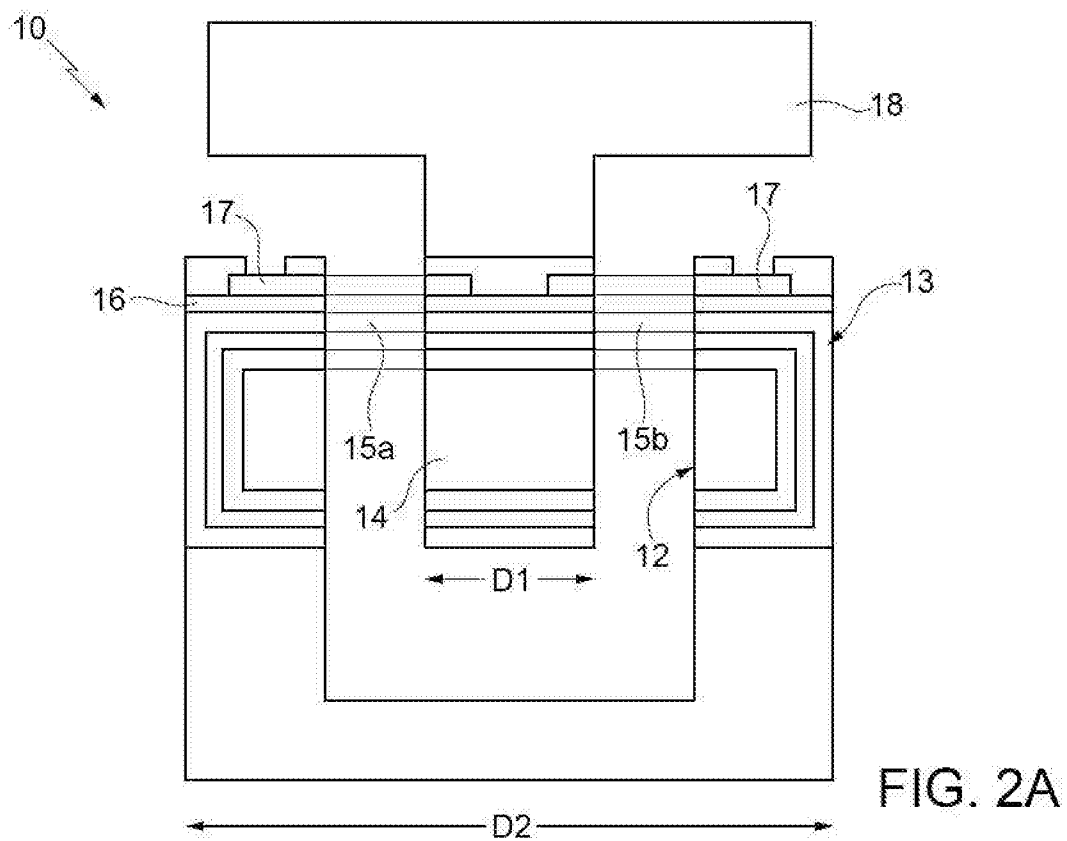
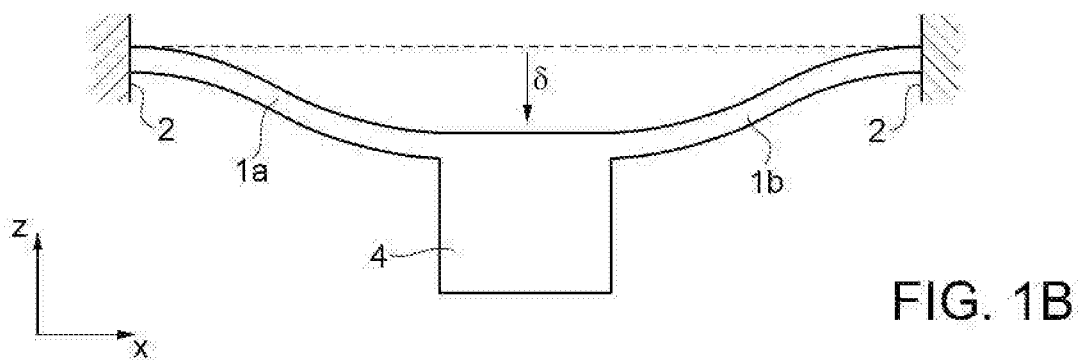
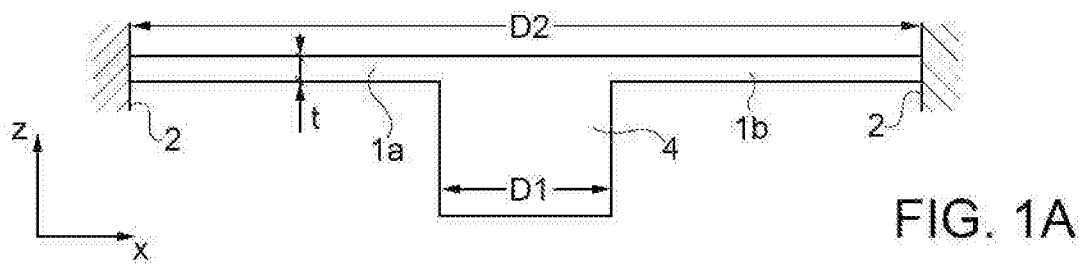
18. Procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 14-17, in cui la fase di formare detta cavità

sepolta (50) comprende inoltre formare un canale sepolto (51) a prolungamento laterale di detta cavità sepolta (50); comprendente inoltre le fasi di: formare una trincea di accesso (54) attraverso una porzione superficiale di detta fetta (41), per raggiungere il canale sepolto (51); ed eseguire una fase di ossidazione termica all'interno della cavità sepolta (50) attraverso la trincea di accesso (54) per formare una regione dielettrica interna (55a), che ricopre pareti interne della cavità sepolta (50) e della trincea di accesso (54).

19. Procedimento secondo la rivendicazione 18, in cui detta fase di eseguire un attacco di detta fetta (41) a partire da detta seconda superficie principale (41b) comprende rimuovere detta regione dielettrica interna (55a) per formare detta cavità di alloggiamento (22).

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

Lorenzo NANNUCCI



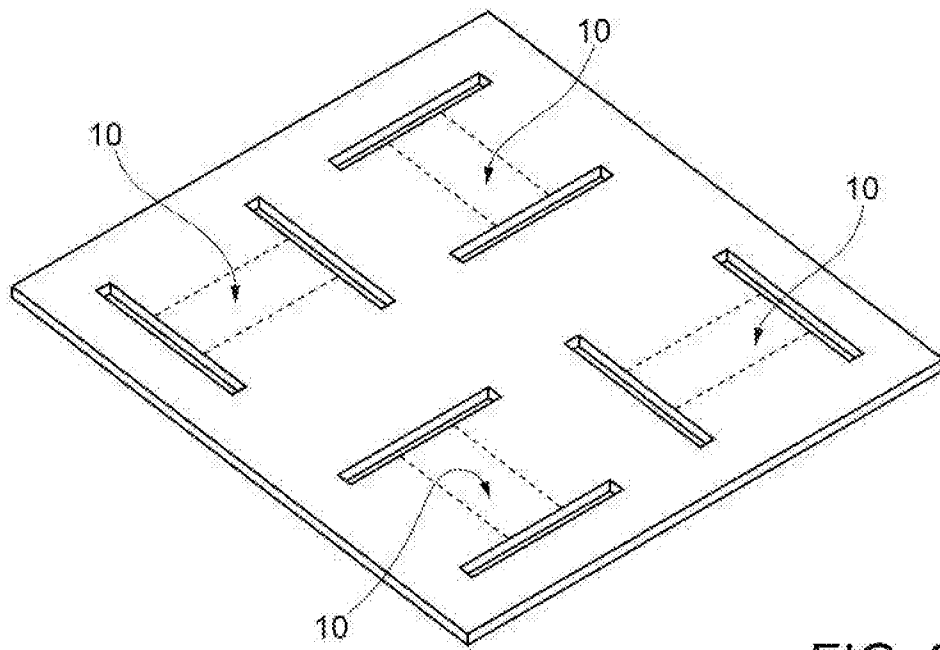


FIG. 2B

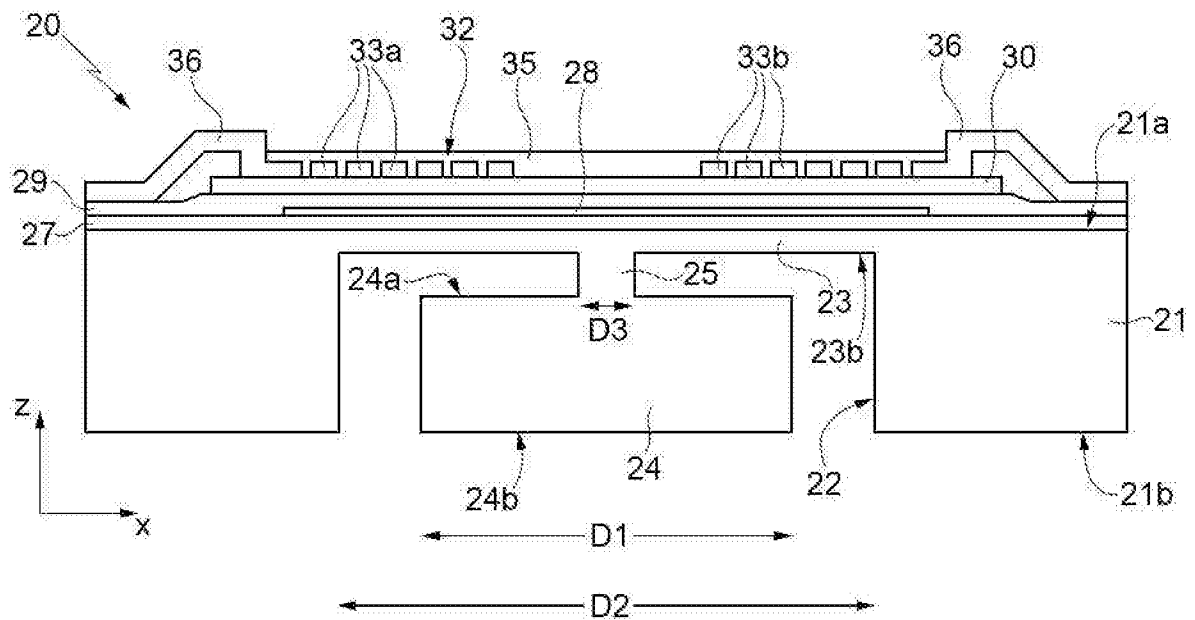


FIG. 3A

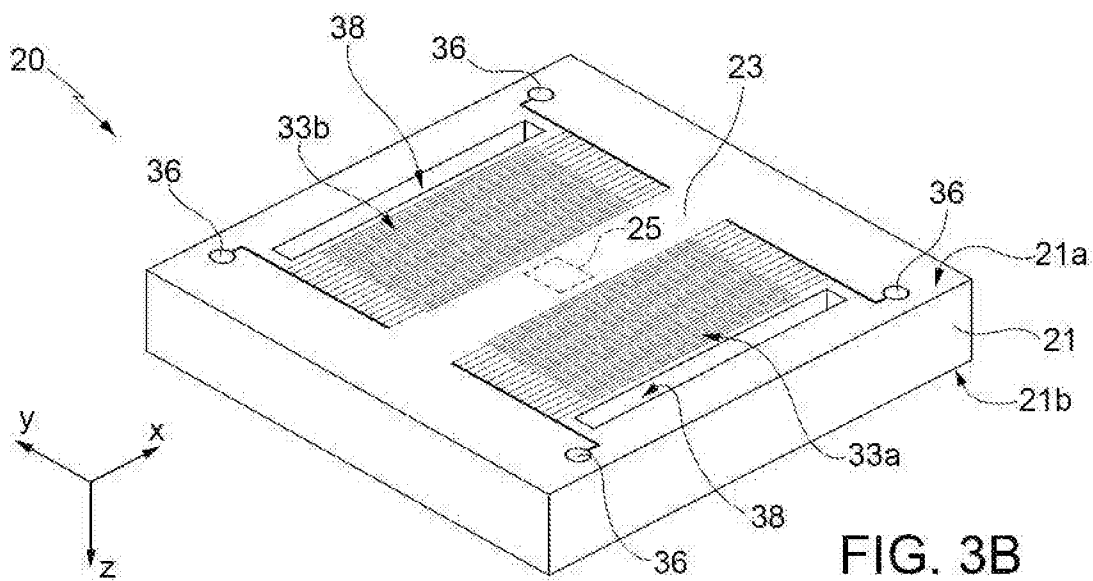


FIG. 3B

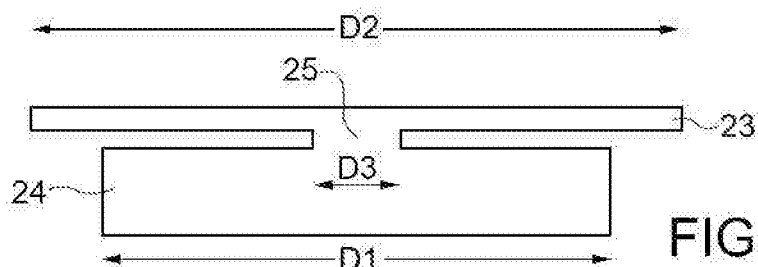


FIG. 4

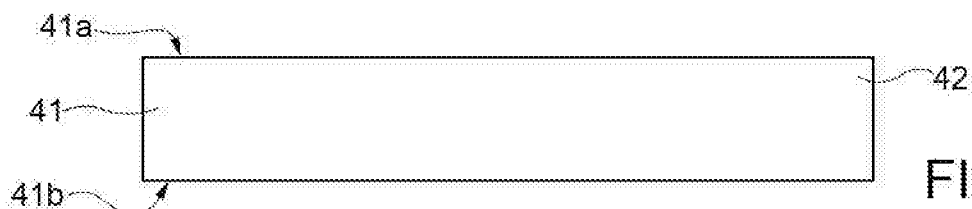


FIG. 5

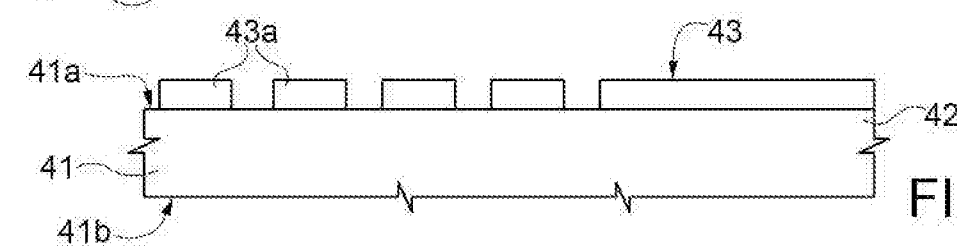


FIG. 6A

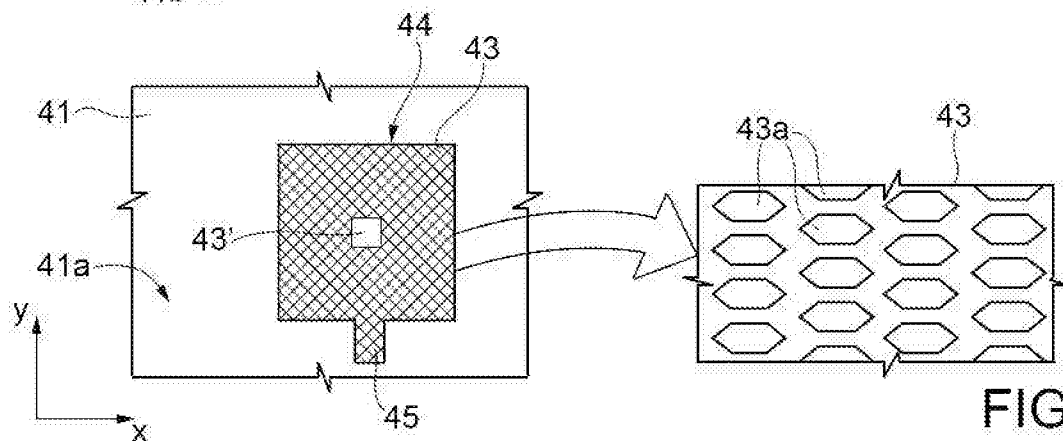
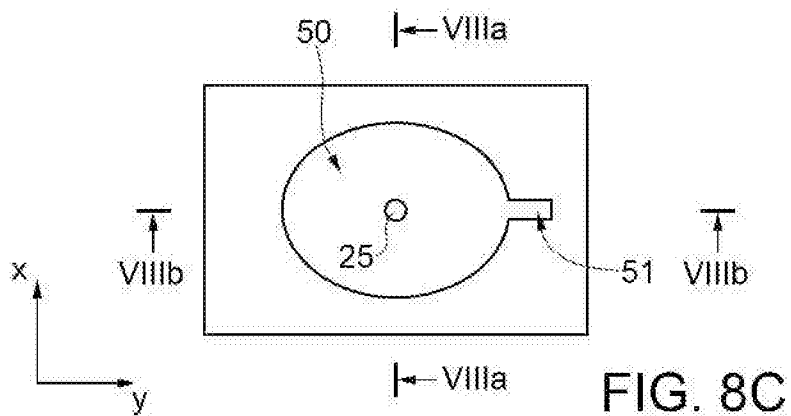
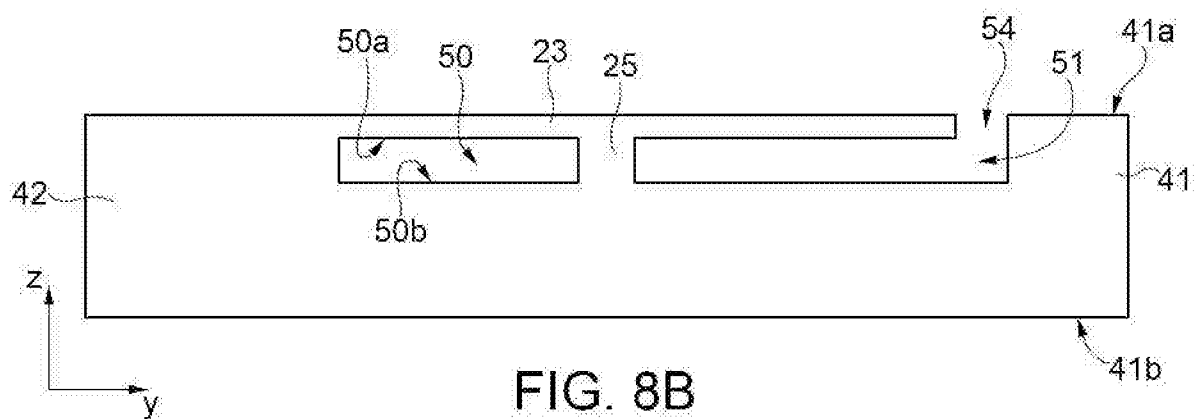
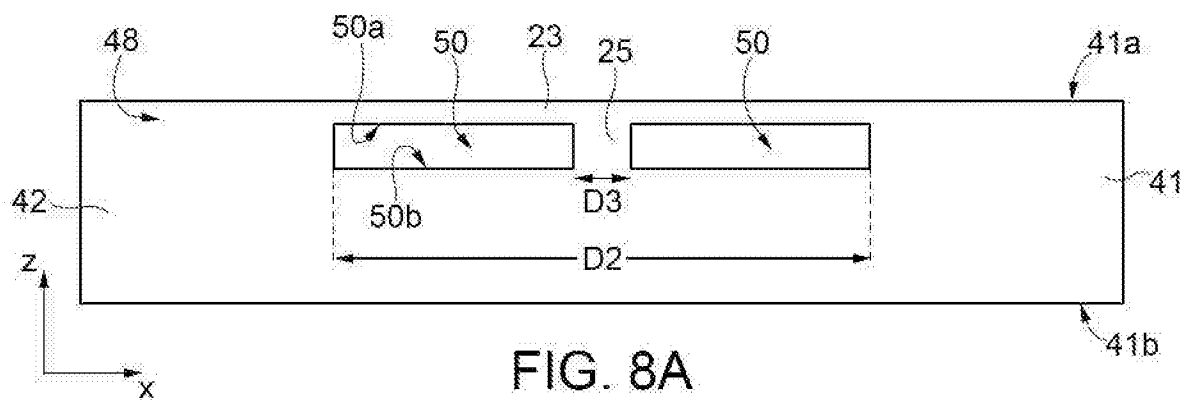
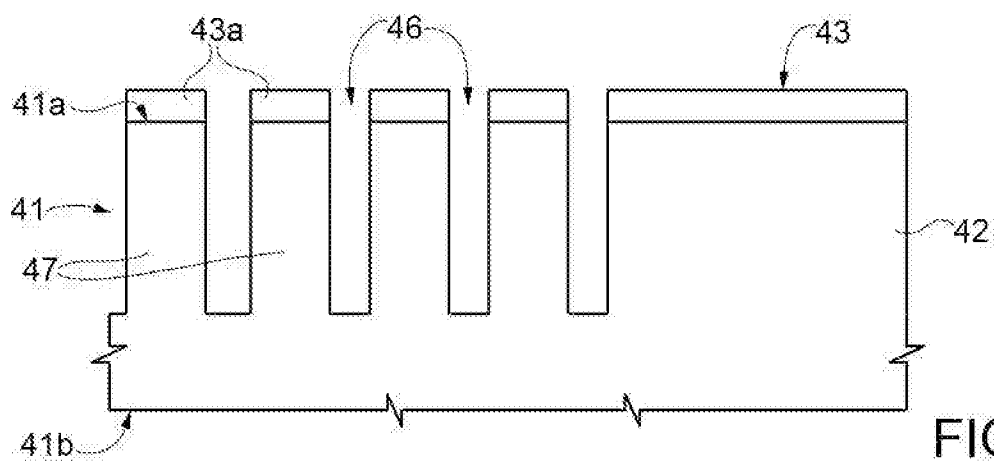


FIG. 6B



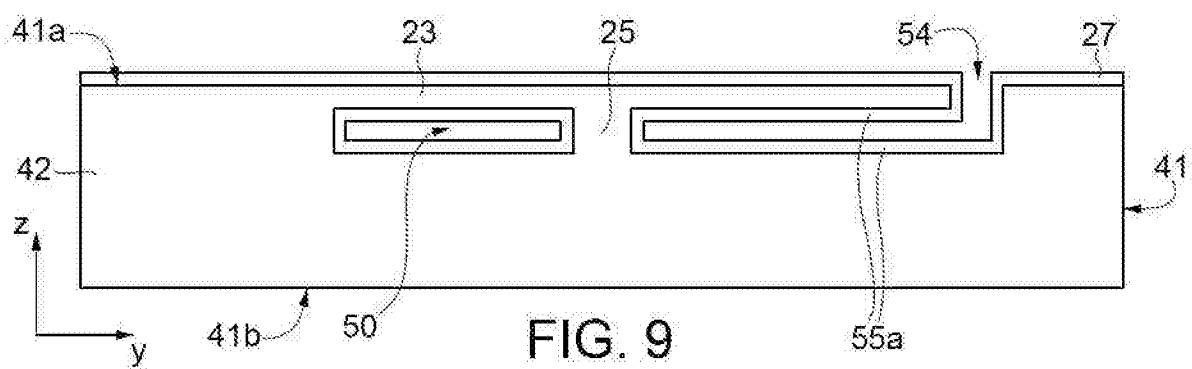


FIG. 9

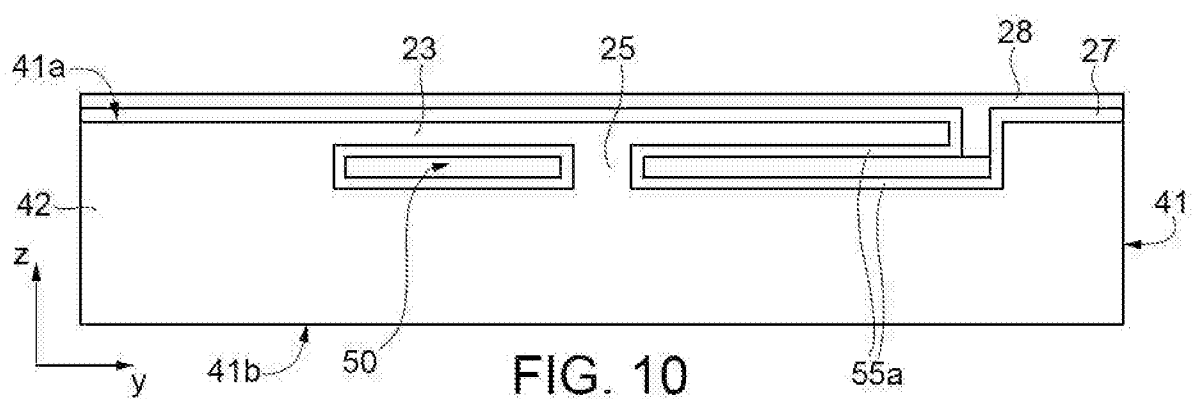


FIG. 10

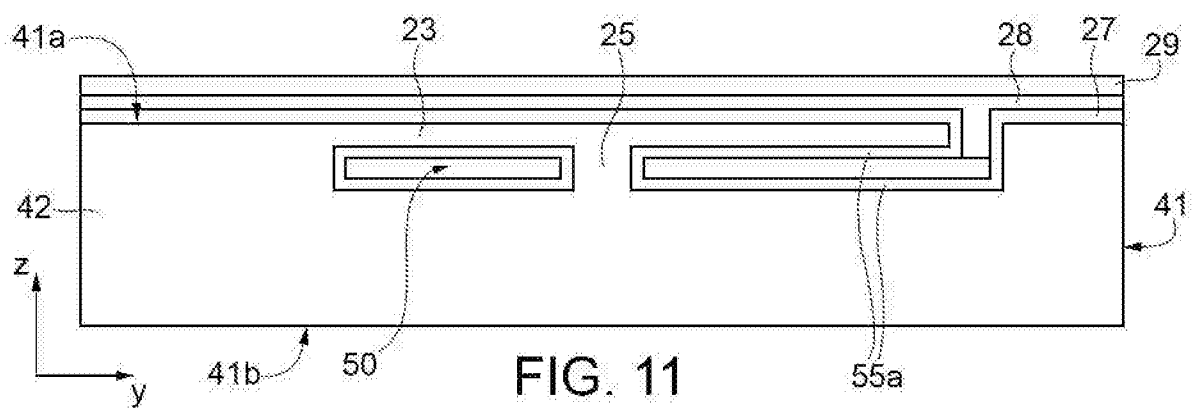


FIG. 11

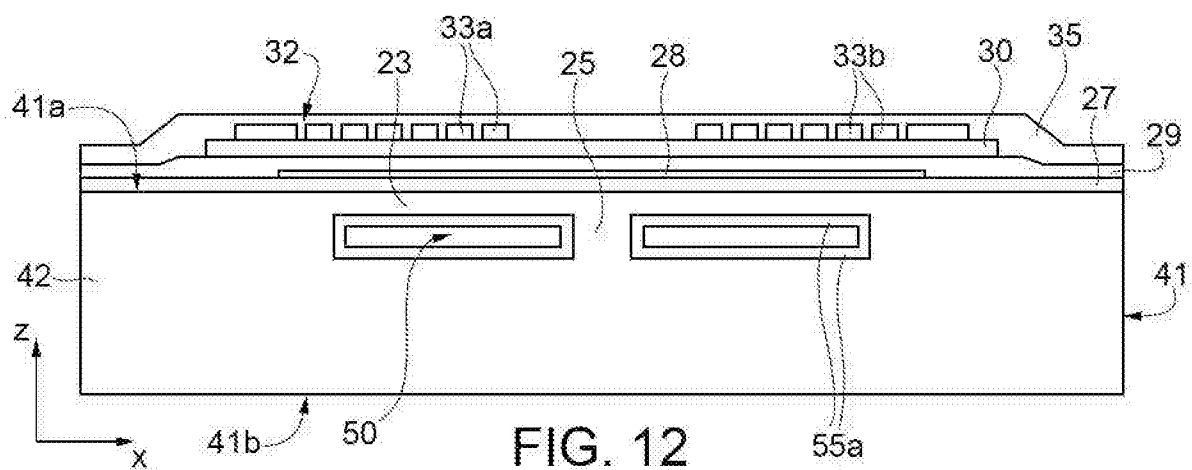
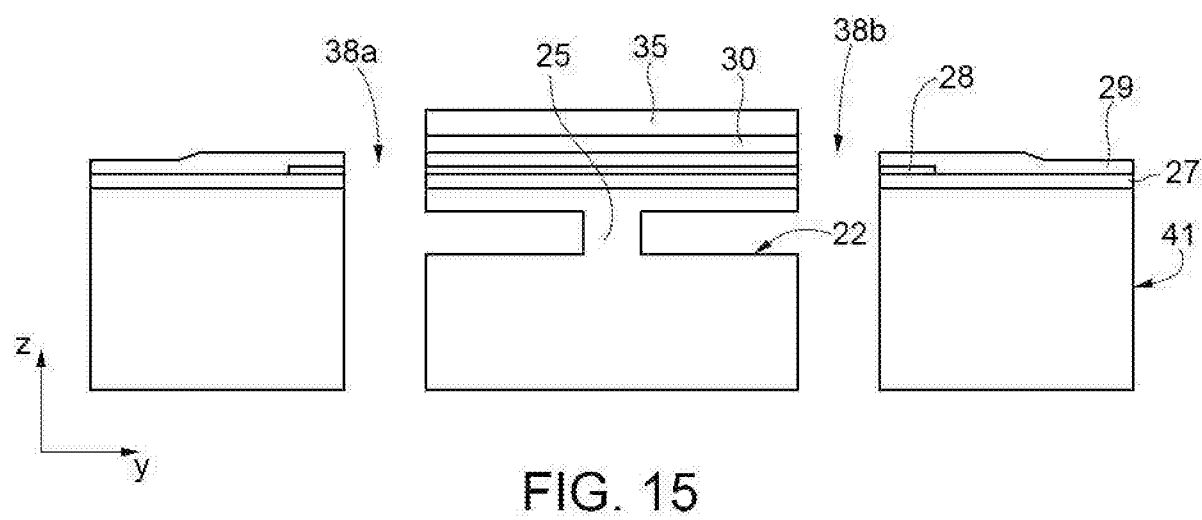
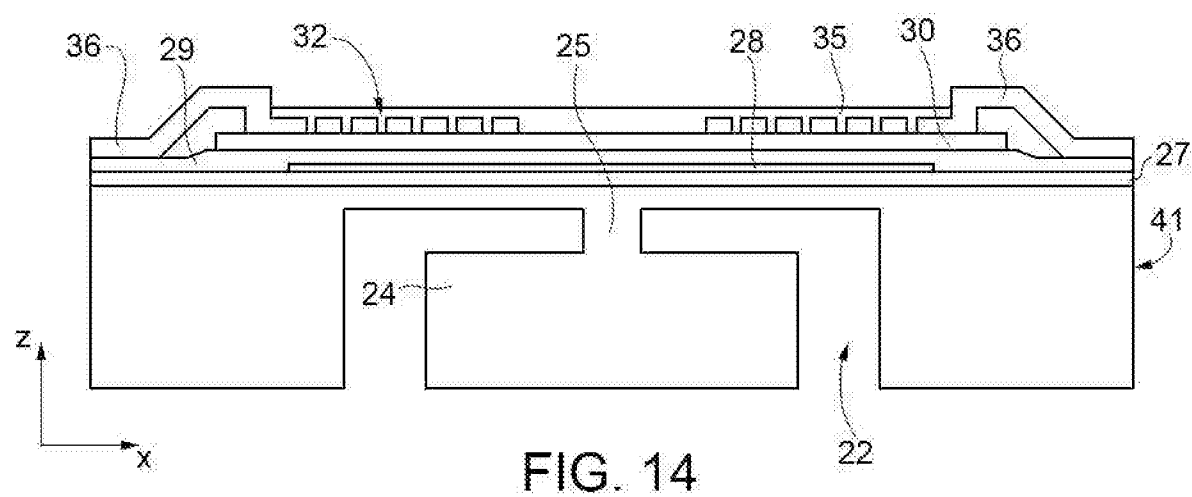
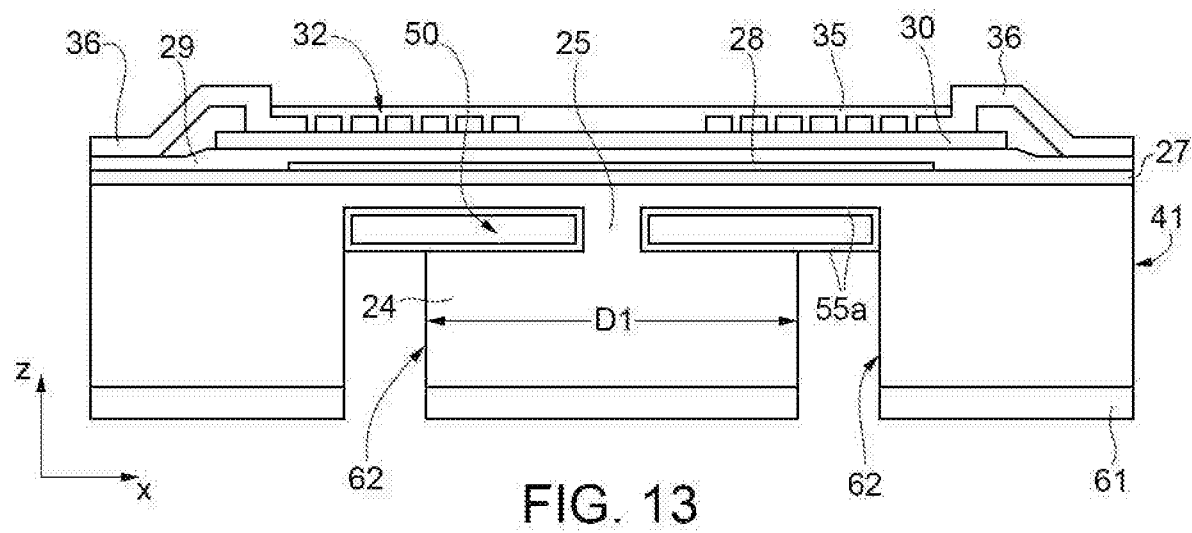


FIG. 12



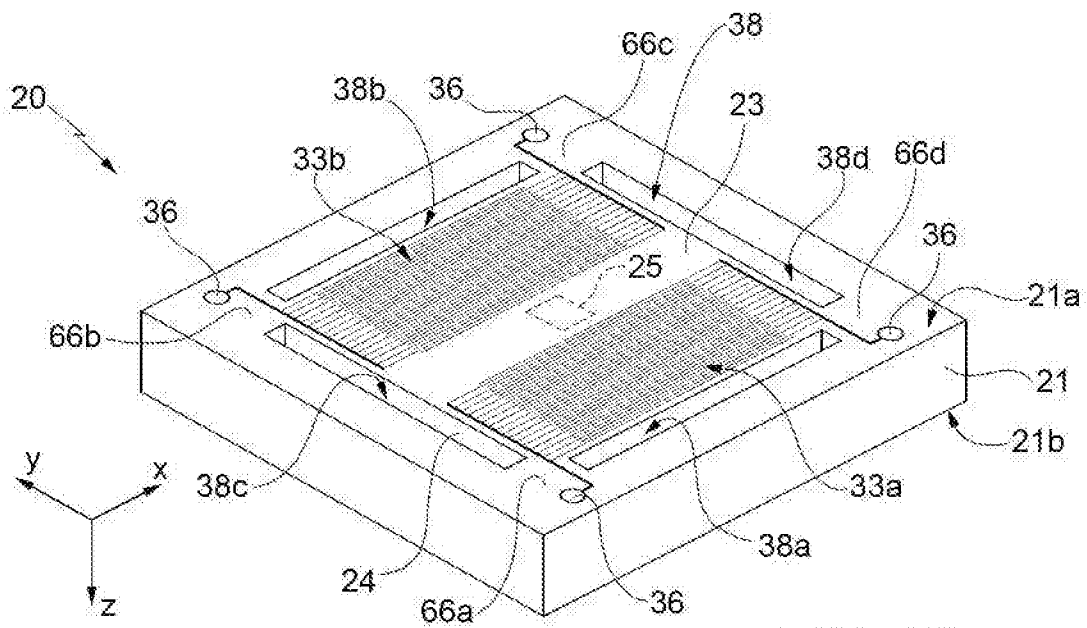


FIG. 16

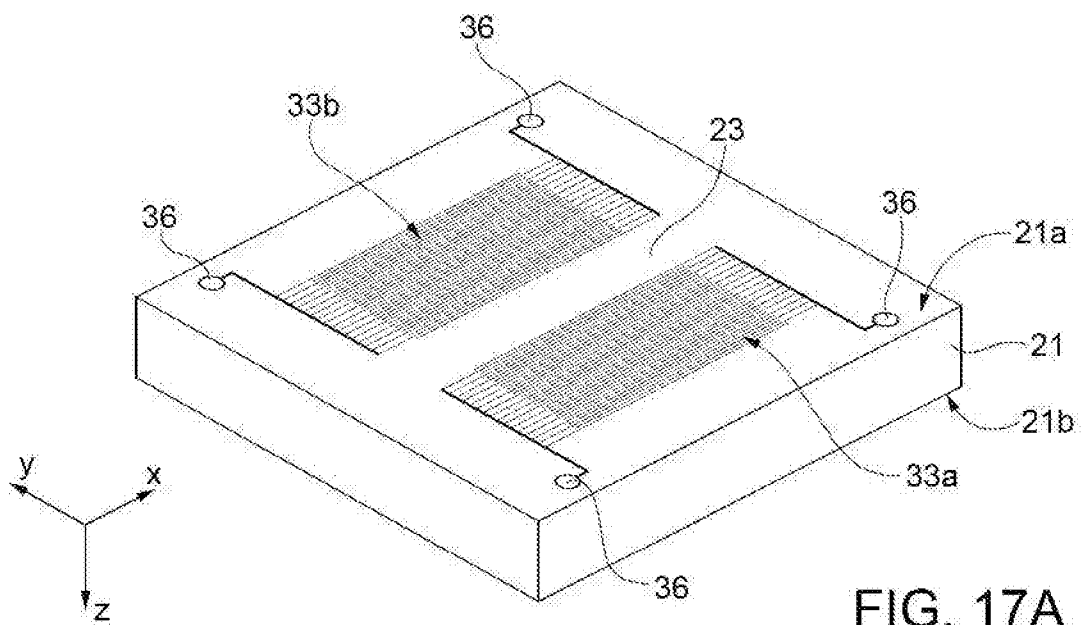


FIG. 17A

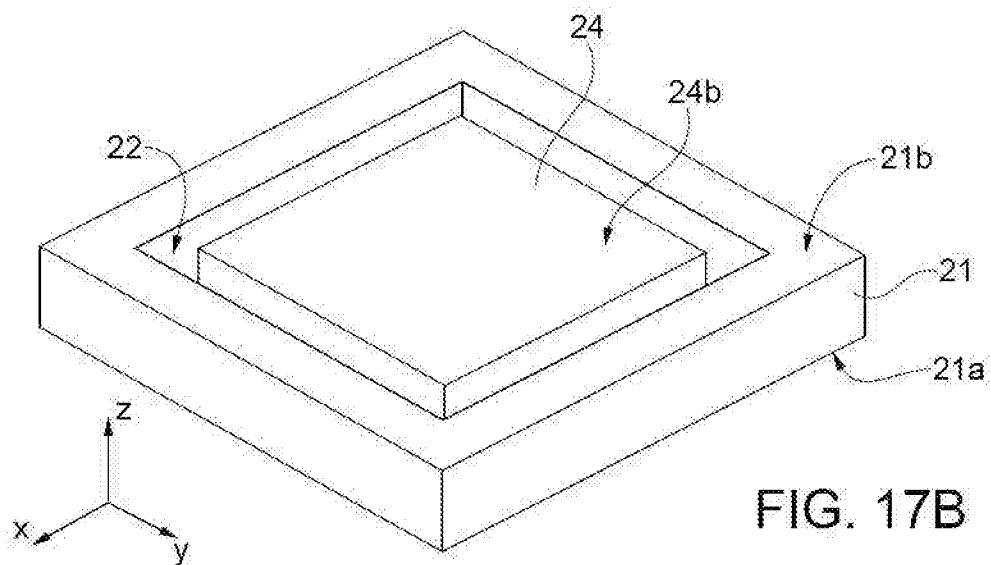


FIG. 17B

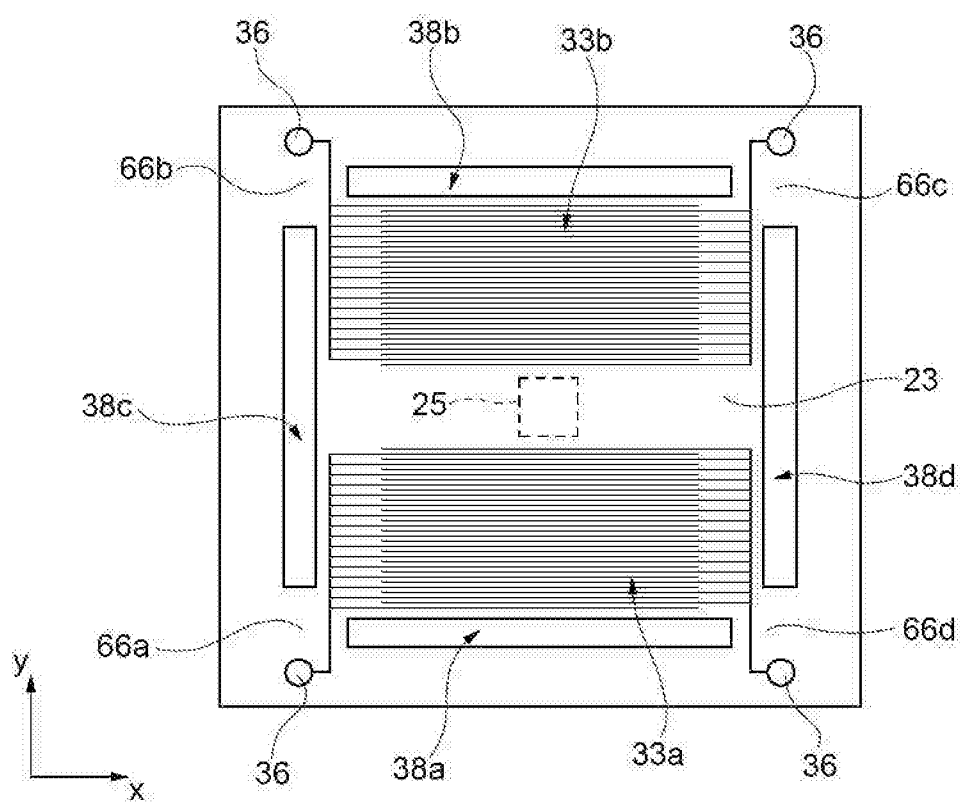


FIG. 18

