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

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	**102019000001017**
Data Deposito	**23/01/2019**
Data Pubblicazione	**23/07/2020**

Classifiche IPC

Titolo

TRASDUTTORE ELETTROACUSTICO MICROELETTROMECCANICO AD ATTUAZIONE PIEZOELETTRICA E RELATIVO PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"TRASDUTTORE ELETTROACUSTICO MICROELETTROMECCANICO AD ATTUAZIONE PIEZOELETTRICA E RELATIVO PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI 2

20864 AGRATE BRIANZA (MB)

Inventori: CERINI Fabrizio, DUQI Enri, ADORNO Silvia, BALDO Lorenzo

* * *

La presente soluzione è relativa ad un trasduttore elettroacustico microelettromeccanico (realizzato in tecnologia MEMS - Micro-Electro-Mechanical System) ad attuazione piezoelettrica e ad un relativo procedimento di fabbricazione; in particolare, in seguito si farà riferimento, senza per questo perdere di generalità, ad un trasduttore MEMS operante da attuatore per la generazione di onde sonore, ovvero ad un altoparlante MEMS.

In modo noto, altoparlanti ad attuazione elettromagnetica sono ad oggi i più utilizzati, ad esempio nella realizzazione di cuffie, auricolari e diffusori per dispositivi portatili (quali ad esempio smartphone, tablet o simili). In particolare, trasduttori del tipo cosiddetto

"Balanced Armature Driver" (BA), basati sul principio di attuazione elettromagnetico, prevedono l'utilizzo di un segnale elettrico per mettere in vibrazione una sottile lamina disposta tra due avvolgimenti magnetici; il movimento di tale lamina è trasferito ad un diaframma, generalmente in alluminio, per la generazione di segnali acustici in banda audio.

Recentemente è stato proposto l'utilizzo di trasduttori acustici, in particolare altoparlanti, realizzati in tecnologia MEMS, il cui funzionamento è basato sul principio piezoelettrico inverso (ovvero, su una deformazione meccanica a seguito di una tensione elettrica applicata).

In generale, tali trasduttori MEMS piezoelettrici, rispetto a tradizionali trasduttori ad attuazione elettromagnetica, possono offrire importanti vantaggi, particolarmente rilevanti per l'utilizzo in dispositivi elettronici portatili, tra cui: un incremento della precisione meccanica in attuazione; una migliore fedeltà nella riproduzione audio; costi, pesi e dimensioni ridotti.

In particolare, è noto che i trasduttori di tipo BA non presentano una risposta in frequenza piatta in banda audio e soffrono di rilevanti effetti di risonanza; al contrario, trasduttori MEMS piezoelettrici possono in generale avere una risposta in frequenza più piatta ed una risposta dinamica più rapida.

Inoltre, trasduttori MEMS piezoelettrici possono garantire di preservare l'integrità acustica anche dopo una immersione completa in un mezzo liquido o in polvere.

Tuttavia, è noto che, in generale, i trasduttori MEMS piezoelettrici presentano una minore robustezza meccanica, risultando maggiormente soggetti a danni in caso di caduta o urto (eventualità del resto piuttosto frequente nel caso di impiego in dispositivi portatili).

Risulta dunque importante progettare i traduttori MEMS piezoelettrici in modo tale da ridurre l'eventualità di danni in caso di cadute o urti e da incrementare la relativa robustezza meccanica.

A questo riguardo, US 2017/0085994 A1 descrive un trasduttore MEMS piezoelettrico dotato di una struttura di arresto (cosiddetta di "stopper") finalizzata a ridurre il rischio di rotture di una relativa membrana acustica.

Come mostrato in Figura 1, il trasduttore MEMS piezoelettrico in questione, indicato in generale con 1, comprende una piastrina 2 di materiale semiconduttore, includente un substrato di supporto 3 avente una conformazione a cornice e circondante un elemento di accoppiamento 4 (formato nella stessa piastrina 2). Una struttura di attuazione 5, includente uno strato di materiale piezoelettrico sovrapposto ad uno strato di polisilicio epitassiale, collega l'elemento di accoppiamento 4 al

substrato di supporto 3, in corrispondenza di una prima superficie 2a della piastrina 2.

Il trasduttore MEMS piezoelettrico 1 comprende inoltre una struttura di alloggiamento 6, avente: una parte inferiore 6a, accoppiata alla prima superficie 2a della piastrina 2, al di sotto della struttura di attuazione 5, definendo una cavità rispetto alla quale la stessa struttura di attuazione 5 risulta sospesa; una parte centrale 6b, accoppiata lateralmente alla stessa piastrina 2; ed una parte superiore 6c, accoppiata al di sopra di una seconda superficie 2b della piastrina 2, opposta verticalmente rispetto alla prima superficie 2a.

In particolare, la suddetta parte superiore 6c della struttura di alloggiamento 6 porta una membrana acustica 7, avente una conformazione ad imbuto ed accoppiata centralmente all'elemento di accoppiamento 4.

Il trasduttore MEMS piezoelettrico 1 comprende inoltre un meccanismo di arresto 8, costituito da: un elemento di rinforzo 9a, accoppiato (in particolare incollato) alla membrana acustica 7 ed avente la stessa conformazione ad imbuto; ed un elemento di arresto 9b, costituito dalla superficie dello stesso substrato di supporto 3 in corrispondenza della seconda superficie 2b della piastrina 2, che si trova affacciata al suddetto elemento di rinforzo 9a normalmente ad una certa distanza di separazione, nella

posizione a riposo della membrana acustica 7.

In uso, l'applicazione di un opportuno segnale di polarizzazione allo strato piezoelettrico della struttura di attuazione 5 causa la deflessione (verso l'alto o verso il basso rispetto ad un asse verticale) della stessa struttura di attuazione 5 e conseguentemente dell'elemento di accoppiamento 4, che causa la corrispondente deflessione della membrana acustica 7, finalizzata all'emissione di onde acustiche in banda audio.

In particolare, il meccanismo di arresto 8 agisce in modo da limitare la massima deflessione della membrana acustica 7 in direzione verticale, solamente verso la parte inferiore 6a della struttura di alloggiamento 6, così da ridurre, in parte, la possibilità di rotture della stessa membrana acustica 7 in caso di urti o cadute.

La presente Richiedente ha verificato che il trasduttore MEMS piezoelettrico 1 presenta alcune limitazioni che non consentono di sfruttarne appieno le caratteristiche vantaggiose.

In particolare, il meccanismo di arresto 8 salvaguarda la membrana acustica 7 da rotture per effetto di movimenti che si verificano soltanto in un verso del suddetto asse verticale; ed il trasduttore MEMS piezoelettrico 1 non presenta alcuna disposizione ("arrangement") di arresto per salvaguardare da rotture la struttura di attuazione 5 ed il

relativo strato di materiale piezoelettrico, che, in caso di urto o cadute, può dunque danneggiarsi e compromettere il funzionamento del trasduttore MEMS piezoelettrico 1.

Lo stesso meccanismo di arresto 8, pur consentendo, come discusso, di limitare i danni per la membrana acustica 7 (in usa sola direzione di movimento), confina la membrana acustica 7 ad avere dimensioni analoghe all'elemento di rinforzo 9a.

Inoltre, la realizzazione del meccanismo di arresto 8, richiedendo l'accoppiamento per incollaggio dell'elemento di rinforzo 9a alla membrana acustica 7, risulta complessa, richiedendo fasi di processo addizionali durante l'accoppiamento della piastrina 2 di materiale semiconduttore, che è stata precedentemente lavorata, alla relativa struttura di alloggiamento 6.

Scopo della presente soluzione è quello di realizzare un trasduttore elettroacustico microelettromeccanico ad attuazione piezoelettrica che consenta di superare gli inconvenienti della tecnica nota.

Secondo la presente soluzione vengono forniti un trasduttore 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, con riferimento ai

disegni allegati, nei quali:

- la Figura 1 mostra una vista prospettica in sezione di un trasduttore elettroacustico MEMS, di tipo noto;

- la Figura 2 mostra una vista in sezione schematica di una struttura di attuazione piezoelettrica di un trasduttore elettroacustico MEMS, secondo una forma di realizzazione della presente soluzione;

- la Figura 3 mostra una vista schematica in pianta dall'alto della struttura di attuazione piezoelettrica di Figura 2;

- la Figura 4 mostra una vista in sezione schematica di una prima forma di realizzazione di un trasduttore elettroacustico MEMS, comprendente la struttura di attuazione piezoelettrica di Figura 2;

- la Figura 5 mostra una vista in sezione schematica di una seconda forma di realizzazione di un trasduttore elettroacustico MEMS, comprendente la struttura di attuazione piezoelettrica di Figura 2;

- le Figure 6A-6L mostrano sezioni schematiche della struttura di attuazione piezoelettrica di Figura 2, in fasi successive di un relativo procedimento di fabbricazione;

- le Figure 7A-7D mostrano viste in pianta dall'alto schematiche di possibili varianti realizzative della struttura di attuazione piezoelettrica di Figura 2; e

- le Figure 8A-8B mostrano sezioni schematiche della

struttura di attuazione piezoelettrica di Figura 2, in fasi iniziali di un relativo procedimento di fabbricazione in accordo con una possibile variante realizzativa.

Con riferimento alla Figura 2 viene ora descritta una struttura di attuazione 10 di un trasduttore elettroacustico MEMS 11 (che sarà illustrato in maggiore dettaglio in seguito), realizzata secondo una prima forma di realizzazione della presente soluzione.

La struttura di attuazione 10 è realizzata in una piastrina 12, comprendente un corpo monolitico 13 di materiale semiconduttore, in particolare silicio monocristallino, avente una superficie anteriore 13a ed una superficie posteriore 13b.

La struttura di attuazione 10 comprende, nello stesso corpo monolitico 13, una cornice (frame) 14 ed un elemento attuatore 15. La cornice 14 circonda l'elemento attuatore 15 ed è separata dallo stesso elemento attuatore 15 da una apertura centrale 16; l'elemento attuatore 15 è disposto in posizione centrale rispetto all'apertura centrale 16 ed ha una conformazione a pilastro.

La struttura di attuazione 10 comprende inoltre, nuovamente realizzati nello stesso corpo monolitico 13, in una porzione superficiale (in corrispondenza della superficie anteriore 13a), elementi a sbalzo 18 (cosiddetti "cantilever"), sospesi al di sopra dell'apertura centrale 16

ed estendentisi tra la cornice 14 e l'elemento attuatore 15. Ciascun elemento a sbalzo 18 ha una prima estremità accoppiata alla cornice 14 ed una seconda estremità accoppiata all'elemento attuatore 15, in corrispondenza di una sua porzione di accoppiamento 15'.

Come sarà discusso anche in seguito, vantaggiosamente, in una forma di realizzazione l'accoppiamento tra gli elementi a sbalzo 18 e l'elemento attuatore 15 è effettuato mediante elementi elastici di accoppiamento 17 (mostrati schematicamente in Figura 3).

La struttura di attuazione 10 comprende inoltre: regioni piezoelettriche 19, disposte al di sopra degli elementi a sbalzo 18, formate da uno o più strati sovrapposti includenti materiale piezoelettrico (in maniera di per sé nota, qui non descritta in dettaglio); ed uno strato di passivazione 20, di materiale dielettrico, disposto sopra le regioni piezoelettriche 19. Nella forma di realizzazione illustrata, gli strati di materiale piezoelettrico si estendono anche al di sopra dell'elemento attuatore 15.

Piste di collegamento elettrico 22 sono disposte sopra lo strato di passivazione 20 ed attraversano lo stesso strato di passivazione 20 all'interno di aperture di contatto 23, per realizzare il collegamento elettrico con le regioni piezoelettriche 19 e consentirne la polarizzazione mediante opportuni segnali elettrici.

L'apertura centrale 16 si estende verticalmente (lungo un asse verticale z ortogonale ad un piano orizzontale xy in cui giacciono le suddette superfici anteriore e posteriore 13a, 13b del corpo monolitico 13) a partire dalla superficie posteriore 13b del corpo monolitico 13 fino agli elementi a sbalzo 18, disposti in corrispondenza della superficie anteriore 13a dello stesso corpo monolitico 13.

Come evidenziato nella suddetta Figura 2, l'apertura centrale 16 presenta una prima larghezza L1 (nella direzione di estensione longitudinale degli elementi a sbalzo 18 nel piano orizzontale xy, lungo un primo asse orizzontale x) in corrispondenza della superficie anteriore 13a del corpo monolitico 13, direttamente al di sotto degli elementi a sbalzo 18; una seconda larghezza L2 attraverso lo spessore del corpo monolitico 13; ed una terza larghezza L3 in corrispondenza della superficie posteriore 13b dello stesso corpo monolitico 13. In particolare, la prima larghezza L1 è maggiore della seconda larghezza L2, e la terza larghezza L3 è maggiore della stessa seconda larghezza L2 (eventualmente, la terza larghezza L3 essendo uguale alla prima larghezza L1).

Di conseguenza, lungo una parete verticale della cornice 14, affacciata all'apertura centrale 16, sono definite, in corrispondenza verticalmente delle porzioni di accoppiamento con gli elementi a sbalzo 18 ed in prossimità

della superficie anteriore 13a del corpo monolitico 13, prime rientranze 25a; analogamente, in corrispondenza della superficie posteriore 13b dello stesso corpo monolitico 13, sono definite seconde rientranze 25b della stessa parete verticale della cornice 14.

In maniera corrispondente, lungo le pareti verticali dell'elemento attuatore 15 affacciate alla stessa apertura centrale 16 sono definite: in corrispondenza della superficie anteriore 13a del corpo monolitico 13, rispettive prime rientranze 26a (realizzate nella relativa porzione di accoppiamento 15'); ed, in corrispondenza della superficie posteriore 13b dello stesso corpo monolitico 13, rispettive seconde rientranze 26b.

Secondo un aspetto della presente soluzione, la struttura di attuazione 10 comprende una prima disposizione (arrangement) di arresto 30, realizzata integralmente alla piastrina 12 ed al corpo monolitico 13, configurata in modo da arrestare il movimento lungo una prima direzione o verso dell'asse verticale z, in particolare in modo da arrestare il movimento degli elementi a sbalzo 18 verso la sottostante apertura centrale 16.

Tale prima disposizione di arresto 30 è definita dalle prime rientranze 25a della cornice 14, che determinano una prima superficie di arresto 30' affacciata agli elementi a sbalzo 18, disposta ad una certa distanza d1 (nella direzione

verticale) rispetto agli stessi elementi a sbalzo 18, in condizione di riposo, ovvero in assenza di deformazioni, degli stessi elementi a sbalzo 18 (la distanza d1 corrispondendo inoltre alla distanza tra la superficie di arresto 30' e la superficie anteriore 13a del corpo monolitico 13).

Si noti che l'estensione della superficie di affaccio, nonché la distanza di affaccio sono definite in maniera univoca dalla conformazione delle suddette prime rientranze 25a della cornice 14.

Anche le rispettive prime rientranze 26a dell'elemento attuatore 15 possono contribuire a definire una ulteriore disposizione di arresto 30, contribuendo ad arrestare il movimento degli elementi a sbalzo 18 lungo la direzione verticale in corrispondenza dello stesso elemento attuatore 15.

La struttura di attuazione 10 comprende inoltre una seconda disposizione di arresto 32, anch'essa realizzata integralmente alla piastrina 12 ed al corpo monolitico 13, configurata in modo da limitare il movimento degli elementi a sbalzo 18 lungo una seconda direzione o verso dell'asse verticale z (opposto al primo verso), e, come sarà evidenziato in seguito, il movimento nel secondo verso di una membrana acustica destinata ad essere accoppiata all'elemento attuatore 15 in corrispondenza della superficie

posteriore 13b del corpo monolitico 13.

Tale seconda disposizione di arresto 30 è definita dalle seconde rientranze 25b della cornice 14, che definiscono una seconda superficie di arresto 32' destinata ad essere affacciata ad un elemento di arresto accoppiato alla suddetta membrana acustica, disposta ad una certa distanza d2 (nella direzione verticale) rispetto allo stesso elemento di arresto, in condizione di riposo, ovvero in assenza di deformazioni (la distanza d2 corrispondendo inoltre alla distanza tra la seconda superficie di arresto 32' e la superficie posteriore 13b del corpo monolitico 13).

Si noti che l'estensione della superficie di affaccio, nonché la distanza di affaccio sono definite in maniera univoca anche in questo caso dalla conformazione delle suddette seconde rientranze 25b della cornice 14.

Le rispettive seconde rientranze 26b dell'elemento attuatore 15 contribuiscono, come del resto sarà chiaro in seguito, a limitare l'adesione dello stesso elemento attuatore 15 ad un nastro adesivo ("tape") durante le fasi di lavorazione; questo nell'ottica di ridurre possibili rotture meccaniche degli elementi a sbalzo 18 durante il distacco dal "tape" della cornice 14 durante le fasi di assemblaggio.

La prima e la seconda disposizione di arresto 30, 32 definiscono dunque congiuntamente un meccanismo di arresto

bidirezionale lungo l'asse verticale z, per limitare ed arrestare i movimenti della struttura di attuazione 10, riducendo in maniera efficace la possibilità di rotture in caso di urti o cadute.

Come mostrato schematicamente in Figura 3, in una possibile forma di realizzazione (raffigurata a titolo di esempio e non essendo da considerare in alcun modo limitativa), la suddetta apertura centrale 16 ha una conformazione genericamente circolare in pianta e gli elementi a sbalzo 18, nell'esempio in numero pari a quattro, hanno conformazione genericamente triangolare in pianta e sono disposti, a coppie, da parti opposte dell'elemento attuatore 15, lungo direzioni diametrali. In maniera non illustrata in dettaglio, gli elementi elastici di accoppiamento 17 che accoppiano ciascun elemento a sbalzo 18 alla porzione di accoppiamento 15' dell'elemento attuatore 15 possono avere una configurazione di tipo ripiegato (cosiddetta "folded").

La Figura 4 mostra una prima forma di realizzazione, assemblata, del trasduttore elettroacustico MEMS 11, che comprende la struttura di attuazione 10 ed inoltre una lamina rigida 34, accoppiata all'elemento attuatore 15, in corrispondenza della superficie posteriore 13b del corpo monolitico 13.

La lamina rigida 34 ha una estensione laterale

(parallelamente all'estensione degli elementi a sbalzo 18 lungo l'asse x) maggiore rispetto all'estensione dell'apertura centrale 16, in modo tale da avere porzioni di estremità affacciate alla seconda superficie di arresto 32' della seconda disposizione di arresto 32, alla distanza d2 rispetto alla stessa seconda superficie di arresto 32' in condizione di riposo.

Il trasduttore elettroacustico MEMS 11 comprende inoltre una sottile membrana acustica 35, accoppiata centralmente (ad esempio incollata) alla lamina rigida 34 in corrispondenza solamente di una relativa porzione centrale e supportata in corrispondenza di rispettive estremità da elementi di supporto 36, accoppiati (ad esempio incollati) al di sopra della superficie posteriore 13b del corpo monolitico 13 in corrispondenza della cornice 14.

La membrana acustica 35 ha una forma concava, ad imbuto e si deforma, in uso, in seguito al movimento dell'elemento attuatore 15 dovuto alla deformazione per effetto piezoelettrico inverso delle regioni piezoelettriche 19, per la generazione di onde acustiche in banda audio (l'elemento attuatore 15 agendo dunque come un attuatore a pistone lungo l'asse verticale z).

In particolare, la prima disposizione di arresto 30 consente di arrestare il movimento degli elementi a sbalzo 18 e della stessa membrana acustica 35 in un primo verso

dell'asse verticale z (nella rappresentazione di Figura 4, verso l'alto); in particolare, le porzioni di estremità degli elementi di arresto 18 vanno in battuta sulla superficie di affaccio (prima superficie di arresto 30') della prima disposizione di arresto 30, in tal modo arrestando il movimento.

La seconda disposizione di arresto 32 consente di arrestare il movimento della membrana acustica 35 e degli elementi a sbalzo 18 nel secondo verso dello stesso asse verticale z (nella rappresentazione di Figura 4, verso il basso); in particolare, la lamina rigida 34 costituisce un elemento di arresto che va in battuta sulla superficie di affaccio (seconda superficie di arresto 32') della seconda disposizione di arresto 32, in tal modo arrestando il movimento.

La Figura 5 mostra una differente forma di realizzazione del trasduttore elettroacustico MEMS, nuovamente indicato con 11, che comprende in questo caso una struttura di involucro 40 esterna alla struttura di attuazione 10, avente una conformazione a cornice intorno alla stessa struttura di attuazione 10.

In particolare, la struttura di involucro 40 comprende: una base 41 a cui è accoppiata la struttura di attuazione 10, al di sopra della superficie anteriore 13a del corpo monolitico 13; ed una porzione di supporto 42, che circonda

la struttura di attuazione 10 ed ha una prima superficie accoppiata alla base 41 ed una seconda superficie, opposta verticalmente alla prima superficie, a cui sono accoppiate le estremità della membrana acustica 35.

Anche in questa forma di realizzazione, come discusso in precedenza, l'applicazione di opportuni segnali elettrici di polarizzazione alle regioni piezoelettriche 19 causa lo spostamento dell'elemento attuatore 15 e la conseguente deformazione della membrana acustica 35, per la generazione di onde acustiche in banda audio.

Nuovamente, la prima disposizione di arresto 30 consente di arrestare il movimento degli elementi a sbalzo 18 e della stessa membrana acustica 35 nel primo verso dell'asse verticale z (nella rappresentazione di Figura 5, verso l'alto); e la seconda disposizione di arresto 32 consente di arrestare il movimento della membrana acustica 35 e degli elementi a sbalzo 18 nel secondo verso dell'asse verticale z (nella rappresentazione di Figura 5, verso il basso).

Tale forma di realizzazione presenta il vantaggio, a scapito di un maggiore ingombro, di consentire una maggiore estensione della membrana acustica 35 e, di conseguenza, di raggiungere valori più elevati di livello di pressione acustica (Sound Pressure Level), a parità di spostamento dell'elemento attuatore 15.

Con riferimento dapprima alla Figura 6A, si descrive ora un possibile procedimento di fabbricazione della struttura di attuazione 10 del trasduttore elettroacustico MEMS 11.

In una fase iniziale del procedimento di fabbricazione, viene predisposta una fetta 45 di materiale semiconduttore, in particolare silicio monocristallino, avente una superficie anteriore 45a ed una superficie posteriore 45b.

Il procedimento di fabbricazione prevede quindi la formazione di una cavità sepolta e completamente contenuta all'interno della fetta 45, sovrastata da una membrana, con tecniche descritte in dettaglio ad esempio in EP 1 324 382 B1 a nome della stessa Richiedente.

Centralmente rispetto alla cavità sepolta viene contestualmente definito un elemento di materiale semiconduttore, in particolare di silicio monocristallino, destinato a formare, come sarà chiarito in seguito la porzione di accoppiamento 15' (si veda la Figura 6D) dell'elemento attuatore 15 della struttura di attuazione 10.

Come mostrato anche nella Figura 6B (non in scala), sulla superficie anteriore 45a della fetta 45 viene dapprima realizzata una maschera di attacco 46, ad esempio di materiale fotosensibile, cosiddetto "fotoresist". La maschera di attacco definisce un'area di attacco, nell'esempio approssimativamente rettangolare (ma può essere

analogamente circolare o genericamente poligonale), e comprende una pluralità di prime porzioni di maschera 46a, ad esempio esagonali, che definiscono un reticolo di aperture, ad esempio a nido d'ape. L'area di attacco della maschera di attacco 46 corrisponde all'area che sarà occupata dalla cavità sepolta e presenta un'estensione corrispondente all'estensione della membrana che sarà formata al di sopra della stessa cavità sepolta. Centralmente, la maschera di attacco 46 presenta una seconda porzione di maschera 46b, piena e priva di aperture, in corrispondenza della quale sarà definita la suddetta porzione di accoppiamento 15'.

Quindi (si faccia riferimento alla figura 6C, che, come la figura 6B, rappresenta soltanto una porzione ingrandita della fetta 45, per ragioni di chiarezza di illustrazione), utilizzando la maschera di attacco 45 viene eseguito un attacco chimico anisotropo della fetta 45 a partire dalla superficie anteriore 45a, in seguito al quale vengono formate trincee 47, comunicanti tra loro e delimitanti una pluralità di colonne 48, di silicio.

In pratica, le trincee 47 formano una regione aperta di forma complessa (corrispondente al reticolo della maschera di attacco 46) nella quale si estendono le colonne 48 (di sezione corrispondente alle prime porzioni di maschera 46a); centralmente rispetto alla suddetta regione aperta rimane inoltre una porzione centrale di materiale semiconduttore

corrispondente alla suddetta seconda porzione di maschera 46b.

Successivamente, la maschera di attacco 46 viene rimossa e viene eseguita una crescita epitassiale in ambiente deossidante (tipicamente, in atmosfera con elevata concentrazione di idrogeno, preferibilmente con triclorosilano-$SiHCl_3$). Di conseguenza, uno strato epitassiale cresce al di sopra delle colonne 48 e chiude superiormente la suddetta regione aperta formata dalle trincee 47.

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 48, gli atomi di silicio migrano completamente dalle porzioni delle colonne 48 presenti all'interno della suddetta regione aperta formata dalle trincee 47, e si forma, a partire da tale regione, una cavità sepolta 50 (come mostrato in Figura 6D che raffigura una porzione più estesa della fetta 45).

Si noti che, all'interno della suddetta cavità sepolta 50 rimane la suddetta porzione centrale di materiale semiconduttore, che definisce la porzione di accoppiamento 15' dell'elemento attuatore 15.

Come mostrato nella stessa figura 6D, al di sopra della cavità sepolta 50 rimane un sottile strato di silicio monocristallino, costituito in parte da atomi di silicio cresciuti epitassialmente ed in parte da atomi di silicio migrati, che forma la membrana, indicata con 49; centralmente, la membrana 49 risulta accoppiata alla porzione di accoppiamento 15', disposta centralmente rispetto alla cavità sepolta 50.

Come mostrato in figura 6E, il procedimento di fabbricazione prosegue quindi con l'ossidazione (che può essere completa, come nell'esempio illustrato, o anche solo parziale, con la formazione di uno strato interno di rivestimento) della cavità sepolta 50, in modo da formare una regione di ossido sepolto 52 al di sotto della membrana 49 e circondante la suddetta porzione di accoppiamento 15'.

In maniera non illustrata in dettaglio, tale fase di ossidazione prevede di eseguire un attacco a partire dalla superficie superiore 45a della fetta 45 attraverso un'opportuna mascheratura, in modo da formare trincee di accesso, che si estendono attraverso la membrana 49 e raggiungono la cavità sepolta 50. Successivamente, viene eseguita una fase di ossidazione termica delle pareti interne della cavità sepolta 50, alimentando ossigeno attraverso le trincee di accesso; l'ossido cresce progressivamente a partire dalle pareti fino alla chiusura completa delle

suddette trincee di accesso ed eventualmente della cavità sepolta 50 (o, in alternativa, con la formazione dello strato di rivestimento all'interno della stessa cavità sepolta 50).

Come mostrato in figura 6F, il procedimento di fabbricazione prosegue quindi con la formazione, al di sopra della superficie anteriore 45a della fetta 45, in corrispondenza superiormente della membrana 49, di una struttura di attuazione piezoelettrica 54, includente materiale piezoelettrico.

In maniera non illustrata in dettaglio, tale struttura di attuazione piezoelettrica 54 può essere formata da un impilamento ("stack") di strati sovrapposti, ad esempio costituito dalla sovrapposizione di uno strato dielettrico inferiore, di un primo strato di elettrodo, di uno strato piezoelettrico, di un secondo strato di elettrodo e di un ulteriore strato dielettrico superiore.

Successivamente, Figura 6G, viene formato al di sopra della struttura di attuazione piezoelettrica 54 uno strato di passivazione (nuovamente indicato con 20, in analogia a quanto discusso in precedenza relativamente alla Figura 2).

Lo stesso strato di passivazione 20 e la sottostante struttura di attuazione piezoelettrica 54 vengono quindi attaccati mediante una opportuna mascheratura, in modo da formare le aperture di contatto 23 verso la stessa struttura di attuazione piezoelettrica 54. In seguito, tali aperture

di contatto vengono riempite da materiale conduttivo in una fase di formazione di piste di collegamento elettrico 22 al di sopra dello strato di passivazione 20, come illustrato in Figura 6H.

In seguito, come mostrato schematicamente in Figura 6I, la struttura di attuazione piezoelettrica 54 e la sottostante membrana 49 vengono sottoposte ad attacco mediante un'opportuna mascheratura, per la definizione della geometria degli elementi a sbalzo 18 e delle sovrastanti regioni piezoelettriche 19 della struttura di attuazione 10. Nella stessa fase di attacco, possono essere formati gli elementi elastici di accoppiamento 17 (che vengono mostrati schematicamente soltanto nella suddetta Figura 6L), che collegano gli elementi a sbalzo 18 alla porzione di accoppiamento 15' dell'elemento attuatore 15 della stessa struttura di attuazione 10.

Successivamente, come mostrato in Figura 6J, la fetta 45 viene capovolta e, al di sopra della superficie posteriore 45b della stessa fetta 45, vengono formate regioni di ossido 58, verticalmente in corrispondenza della porzione di accoppiamento 15' (regione di ossido interna 58a) ed esternamente rispetto alla posizione assunta dagli elementi a sbalzo 18 in corrispondenza della superficie anteriore 45a (regione di ossido esterna 58b); in particolare, le regioni di ossido esterna ed interna 58b, 58a sono separate lungo la

direzione di estensione longitudinale degli elementi a sbalzo 18 della terza larghezza L3.

Al di sopra delle regioni di ossido 58 vengono quindi formate regioni di maschera 59, ed in particolare una regione di maschera interna 59a che ricopre la regione di ossido interna 58a ed una regione di maschera esterna 59b che ricopre la regione di ossido esterna 58b; le regioni di maschera esterna ed interna 59b, 59a sono separate lungo la suddetta direzione di estensione longitudinale degli elementi a sbalzo 18 della seconda larghezza L2.

Viene quindi eseguito un primo attacco della fetta 45, a partire dalla superficie posteriore 45b, attraverso le regioni di maschera 59, per la formazione di cavità profonde 60 (aventi la suddetta seconda larghezza L2) che si estendono verticalmente nella fetta 45, a partire dalla suddetta superficie posteriore 45b fino a raggiungere la regione di ossido sepolto 52.

Vengono quindi rimosse le regioni di maschera 59 e viene eseguito, Figura 6K, un ulteriore attacco della fetta 45, nuovamente a partire dalla superficie posteriore 45b, questa volta attraverso le regioni di ossido 58 per la formazione di cavità superficiali 61 (aventi la suddetta terza larghezza L3) che si estendono in una porzione superficiale della fetta 45 in corrispondenza dalla suddetta superficie posteriore 45b.

Si noti che i suddetti attacchi eseguiti in successione portano dunque (contestualmente, ovvero senza bisogno di ulteriori e distinte fasi di lavorazione) alla formazione della seconda disposizione di arresto 32, ed in particolare della seconda superficie di arresto 32'. Si noti in particolare che le caratteristiche geometriche delle regioni di maschera 59 e delle regioni di ossido 58 e le caratteristiche dell'attacco determinano le caratteristiche dimensionali della suddetta seconda disposizione di arresto 32 ed in particolare l'estensione della seconda superficie di arresto 32' e la distanza della stessa seconda superficie di arresto 32' rispetto alla superficie posteriore 45b (ovvero la distanza d2).

Si noti che, vantaggiosamente, l'indentazione che si definisce nell'elemento attuatore 15 in corrispondenza della superficie posteriore 45b della fetta 45 (al di sotto della regione di ossido interna 58a di Figura 6K) limita l'adesione dello stesso elemento attuatore 15 al nastro adesivo "tape" durante le successive fasi di lavorazione (si riducono quindi possibili rotture meccaniche degli elementi a sbalzo 18 durante il distacco dal "tape" della fetta 45 durante le fasi di assemblaggio).

In seguito, figura 6L, dopo che la fetta 45 è stata nuovamente capovolta, si procede alla rimozione dell'ossido di silicio mediante attacco chimico in umido (wet), ed in

particolare alla rimozione delle suddette regioni di ossido 58 in corrispondenza della superficie posteriore 45b ed inoltre della regione di ossido sepolto 52 precedentemente realizzata all'interno della cavità sepolta 50.

In particolare, la rimozione della suddetta regione di ossido sepolto 52 porta alla formazione completa dell'apertura centrale 16 (che risulta formata congiuntamente dalla suddetta cavità sepolta 50, avente larghezza L1, e dalle cavità profonde e superficiali 60, 61) ed inoltre al rilascio degli elementi a sbalzo 18, che risultano sospesi al di sopra della stessa apertura centrale 16.

La suddetta rimozione dell'ossido sepolto porta anche (contestualmente, ovvero senza bisogno di ulteriori e distinte fasi di lavorazione) alla definizione della prima disposizione di arresto 30, ed in particolare della prima superficie di arresto 30' affacciata agli elementi a sbalzo 18.

Si noti che le caratteristiche geometriche delle regioni di maschera 59 (mostrate nella suddetta Figura 6J) e le caratteristiche geometriche della cavità sepolta 50 determinano in questo caso le caratteristiche dimensionali della suddetta prima disposizione di arresto 30 ed in particolare l'estensione della prima superficie di arresto 30' e la distanza d1 della stessa prima superficie di arresto

30' rispetto agli elementi a sbalzo 18.

Il procedimento termina quindi (in maniera non illustrata) con il taglio della fetta 45 per la definizione di una pluralità di piastrine 12, comprendenti ciascuna, nello stesso corpo monolitico 13, la cornice 14, l'elemento attuatore 15 ed i suddetti elementi a sbalzo 18, interposti tra la stesa cornice 14 e lo stesso elemento attuatore 15.

I vantaggi della presente soluzione emergono in maniera evidente dalla descrizione precedente.

In ogni caso, si evidenzia che la struttura di attuazione 10 del trasduttore elettroacustico MEMS 11 include elementi di arresto bidirezionali, ovvero in entrambe le direzioni dell'asse verticale z, consentendo, in caso di urti o cadute, di limitare efficacemente i danni sia per la membrana acustica 35 sia per gli elementi a sbalzo 18 e le sovrastanti regioni piezoelettriche 19.

Vantaggiosamente, la prima e la seconda disposizione di arresto 30, 32 sono integrate e definite nella stessa piastrina 12 in cui è realizzata la struttura di attuazione 10, senza che siano necessari accoppiamenti con strutture esterne, risultando dunque di semplice realizzazione e avendo ingombri contenuti. In particolare, le caratteristiche dimensionali delle disposizioni di arresto 30, 32 sono diretta conseguenza del procedimento di fabbricazione utilizzato per la realizzazione della

struttura di attuazione 10, risultando in tal modo agevole variare l'estensione della superficie di affaccio e la distanza di affaccio, in particolare tra la prima superficie di arresto 30' e gli affacciati elementi a sbalzo 18 e tra la seconda superficie di arresto 32' e l'affacciata lamella rigida 34 (come evidenziato schematicamente dai rettangoli tratteggiati e dalle frecce in Figura 2).

Lo stesso procedimento di fabbricazione risulta semplice e di economica realizzazione, non essendo sostanzialmente richieste fasi addizionali e dedicate per la realizzazione delle disposizioni di arresto 30, 32.

Inoltre, gli elementi a sbalzo 18, essendo realizzati in silicio monocristallino, risultano privi di stress residui (stress-free).

La struttura ed il procedimento descritti garantiscono una ampia libertà di progetto nella realizzazione degli elementi a sbalzo 18, in particolare nell'ottica di ottenere una struttura che, massimizzando lo spostamento dell'elemento attuatore 15 connesso alla membrana acustica 35, ne massimizza la potenza sonora (dB SPL) rispetto a soluzioni note.

Il trasduttore elettroacustico MEMS 11 risulta vantaggiosamente protetto da contaminazioni, di fatto essendo resistente a liquidi ("waterproof") ed alla polvere ("dustproof"), essendo sviluppato in tecnologia

piezoelettrica.

Risulta infine chiaro che a quanto descritto ed illustrato possono essere apportate modifiche e varianti senza per questo uscire dall'ambito di tutela della presente invenzione, come definito nelle rivendicazioni allegate.

In particolare, si evidenzia che possono essere previste varianti per quanto riguarda il numero e la forma degli elementi a sbalzo 18 ed inoltre per quanto riguarda il relativo accoppiamento all'elemento attuatore 15, in particolare nell'ottica di ottenere strutture più performanti in termini di potenza sonora erogata con maggiore linearità della risposta in frequenza.

A questo riguardo, le Figure 7A-7D mostrano schematicamente possibili varianti realizzative, in particolare in cui: gli elementi a sbalzo 18 sono nuovamente in numero pari a quattro ed accoppiati elasticamente all'elemento attuatore 15 mediante rispettivi elementi elastici ("molle") di accoppiamento 17, avendo però in questo caso una forma genericamente trapezoidale (Figura 7A); gli elementi a sbalzo 18 sono nuovamente in numero pari a quattro ed hanno una forma genericamente triangolare, essendo collegati direttamente ed integralmente all'elemento di accoppiamento 15, ovvero senza la presenza di elementi elastici di accoppiamento (Figura 7B) - anche in questo caso gli stessi elementi elastici potrebbero in ogni caso essere

presenti; gli elementi a sbalzo 18 sono in numero pari a due, accoppiati elasticamente all'elemento attuatore 15 mediante rispettivi elementi elastici di accoppiamento 17 ed aventi una forma genericamente a semi-anello circolare (Figura 7C); gli elementi a sbalzo 18 sono in numero pari a quattro, accoppiati elasticamente all'elemento attuatore 15 mediante rispettivi elementi elastici di accoppiamento 17, avendo una forma genericamente rettangolare e portati da una stessa struttura esterna 63 con conformazione ad anello circolare (Figura 7D).

Si sottolinea in ogni caso che ulteriori varianti possono essere previste, anche per quanto riguarda la forma della piastrina 12 e la geometria in pianta della apertura centrale 16 (che, come indicato in precedenza, può essere genericamente poligonale, anziché circolare).

Inoltre, le regioni piezoelettriche 19 possono estendersi anche al di sopra dell'elemento attuatore 15, oppure essere rimosse dalla superficie anteriore 13a del corpo monolitico 13 in corrispondenza dello stesso elemento attuatore 15.

Le stesse regioni piezoelettriche 19 possono anche essere di tipo "bi-morfo", ovvero includere un doppio strato di materiale piezoelettrico, ciascuno strato essendo interposto tra due elettrodi.

In maniera non illustrata, il trasduttore

elettroacustico MEMS 11 può comprendere inoltre un circuito elettronico ASIC (Application Specific Integrated Circuit), accoppiato alla struttura di attuazione 10, ad esempio per fornire i segnali di polarizzazione elettrica; tale circuito elettronico ASIC può essere integrato nella stessa piastrina 12 in cui è realizzata la struttura di attuazione 10, oppure essere realizzato in una distinta piastrina di materiale semiconduttore, che può essere alloggiata nello stesso involucro con la suddetta piastrina 12.

Possono inoltre essere previste varianti del procedimento di fabbricazione, per la realizzazione in particolare della struttura di attuazione 10.

A questo riguardo, un procedimento di fabbricazione alternativo può prevedere differenti fasi iniziali per la realizzazione della regione di ossido sepolto 52 al di sotto della superficie anteriore 45a della fetta 45.

In particolare, con riferimento dapprima alla Figura 8A, il procedimento può prevedere in tal caso la predisposizione di una fetta SOI (Silicon-On-Insulator), nuovamente indicata con 45, avente uno strato attivo 66 ad esempio di silicio monocristallino, uno strato isolante 67 ad esempio di ossido di silicio, ed uno strato di supporto 68 ad esempio nuovamente di silicio monocristallino.

In questo caso, in una fase iniziale del procedimento, lo strato attivo 66 (dopo essere stato eventualmente

sottoposto ad un assottigliamento superficiale) e lo strato isolante 67 vengono sottoposti ad attacco, in modo da definire una regione impilata 69 di porzioni dello stesso strato attivo 66 e dello stesso strato isolante 67 che presenta una estensione corrispondente a quella che sarà l'apertura centrale 16 ed ha centralmente un'apertura corrispondente a quella che sarà la disposizione della porzione di accoppiamento 15' dell'elemento attuatore 15.

Successivamente, figura 8B, la superficie anteriore della fetta viene sottoposta a ricrescita di silicio e a planarizzazione, in modo tale che si vengano a formare, a partire dalla suddetta regione impilata 69, la regione di ossido sepolto 52, la membrana 49, al di sopra della stessa regione di ossido sepolto 52, e la suddetta porzione di accoppiamento 15' dell'elemento attuatore 15. Si noti che, in seguito alla ricrescita, si viene dunque a formare un corpo monolitico di silicio monocristallino, in maniera del tutto analoga a quanto descritto in precedenza.

Il procedimento di fabbricazione può procedere quindi in maniera del tutto analoga a quanto discusso in precedenza (in particolare, a partire dalla Figura 6F).

Si evidenzia infine che il trasduttore elettroacustico MEMS 11 può agire per il rilevamento di onde acustiche, ovvero costituire un sensore microfonico MEMS (anziché un altoparlante MEMS, che è stato descritto in precedenza).

RIVENDICAZIONI

1. Struttura di attuazione (10) di un trasduttore elettroacustico MEMS (11), comprendente una piastrina (12) di materiale semiconduttore avente un corpo monolitico (13) con una superficie anteriore (13a) ed una superficie posteriore (13b) estendentisi in un piano orizzontale (xy) ed in cui sono definiti: una cornice (14); un elemento attuatore (15) disposto in un'apertura centrale (16) definita da detta cornice (14); elementi a sbalzo (18), accoppiati in corrispondenza di detta superficie anteriore (13a) tra detto elemento attuatore (15) e detta cornice (14); e regioni piezoelettriche (19) sovrapposte a detti elementi a sbalzo (18) ed atte ad essere polarizzate per causare una deformazione di detti elementi a sbalzo (18) per effetto piezoelettrico,

caratterizzato dal fatto di comprendere una prima disposizione di arresto (30), integrata in detta piastrina (12) e configurata per interagire con detti elementi a sbalzo (18) per limitarne un movimento in una prima direzione di un asse verticale (z) ortogonale a detto piano orizzontale (xy), verso la sottostante apertura centrale (16).

2. Struttura secondo la rivendicazione 1, in cui detta cornice (14) presenta una parete affacciata a detta apertura centrale (16) ed estendentesi lungo detto asse verticale (z), e detta prima disposizione di arresto (30) comprende prime rientranze (25a) della parete di detta cornice (14) in

corrispondenza di detta superficie anteriore (13a), che determinano una prima superficie di arresto (30') affacciata agli elementi a sbalzo (18), disposta ad una prima distanza (d1) rispetto a detti elementi a sbalzo (18), in condizione di riposo, ovvero in assenza di deformazioni degli stessi elementi a sbalzo (18) per effetto piezoelettrico.

3. Struttura secondo la rivendicazione 2, in cui detto elemento di accoppiamento (15) presenta una rispettiva parete affacciata a detta apertura centrale (16) ed estendentesi lungo detto asse verticale (z), e detta prima disposizione di arresto (30) comprende rispettive prime rientranze (26a) della parete di detto elemento di accoppiamento (15) in corrispondenza di detta superficie anteriore (13a), che determinano una rispettiva superficie di arresto (30') affacciata agli elementi a sbalzo (18).

4. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre una seconda disposizione di arresto (32), anch'essa integrata in detta piastrina (12) e configurata per limitare un movimento di detti elementi a sbalzo (18) in una seconda direzione di detto asse verticale (z), in allontanamento dalla sottostante apertura centrale (16); dette prima (30) e seconda (32) disposizione di arresto definendo congiuntamente un meccanismo di arresto bidirezionale lungo detto asse verticale (z) per detta struttura di attuazione (10).

5. Struttura secondo la rivendicazione 4, in cui detta cornice (14) presenta una parete affacciata a detta apertura centrale (16) ed estendentesi lungo detto asse verticale (z), e detta seconda disposizione di arresto (32) comprende seconde rientranze (25b) della parete di detta cornice (14) in corrispondenza di detta superficie posteriore (13b), che determinano una seconda superficie di arresto (32'), disposta ad una seconda distanza (d2) rispetto a detta superficie posteriore (13b).

6. Struttura secondo la rivendicazione 5, in cui detto elemento di accoppiamento (15) presenta una rispettiva parete affacciata a detta apertura centrale (16) ed estendentesi lungo detto asse verticale (z), e detta seconda disposizione di arresto (32) comprende rispettive seconde rientranze (26b) della parete di detto elemento di accoppiamento (15) in corrispondenza di detta superficie posteriore (13b), che determinano una rispettiva superficie di arresto (32').

7. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detta apertura centrale (16) include: una prima cavità (50) in corrispondenza di detta superficie anteriore (13a) sottostante detti elementi a sbalzo (18) ed avente una prima larghezza (L1) in una direzione longitudinale di estensione di detti elementi a sbalzo (18) lungo un asse orizzontale (x) di detto piano orizzontale (xy); una seconda cavità (60) sottostante detta prima cavità

(50) ed avente una seconda larghezza (L2) in detta direzione longitudinale; ed una terza cavità (61) in corrispondenza di detta superficie posteriore (13b) sottostante detta seconda cavità (60) ed avente una terza larghezza (L3) in detta direzione longitudinale; in cui detta prima larghezza (L1) e detta terza larghezza (L3) sono maggiori di detta seconda larghezza (L2).

8. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detti elementi a sbalzo (18) presentano una prima estremità accoppiata a detta cornice (14) ed una seconda estremità accoppiata elasticamente ad una porzione di accoppiamento (15') di detto elemento attuatore (15) mediante rispettivi elementi elastici di accoppiamento (17).

9. Struttura secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detti elementi a sbalzo (18) sono costituiti di silicio monocristallino.

10. Trasduttore elettroacustico MEMS (11), comprendente una struttura di attuazione (10) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, ed una membrana acustica (35) accoppiata centralmente a detto elemento attuatore (15); in cui la deformazione di detti elementi a sbalzo (18) per effetto piezoelettrico è atta a determinare lo spostamento di detto elemento attuatore (15) ed il corrispondente spostamento di detta membrana acustica (35).

11. Trasduttore secondo la rivendicazione 10,

comprendente inoltre un elemento rigido di arresto (34) interposto tra detta membrana acustica (35) e detto elemento attuatore (15) in corrispondenza di detta superficie posteriore (13b).

12. Trasduttore secondo la rivendicazione 10 o 11, in cui detta membrana acustica (35) presenta porzioni di estremità accoppiate ad elementi di supporto (36) accoppiati a detta cornice (14) in corrispondenza di detta superficie posteriore (13b) di detto corpo monolitico (13).

13. Trasduttore secondo la rivendicazione 10 o 11, comprendente inoltre una struttura di involucro (40) avente: una base (41) a cui è accoppiata la struttura di attuazione (10), in corrispondenza della superficie anteriore (13a); ed una porzione di supporto (42), che circonda la struttura di attuazione (10) ed ha una prima superficie accoppiata alla base (41) ed una seconda superficie, opposta verticalmente alla prima superficie, a cui sono accoppiate porzioni di estremità di detta membrana acustica (35).

14. Trasduttore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 10-13, definente un altoparlante per la generazione di onde sonore in banda audio.

15. Procedimento di fabbricazione di una struttura di attuazione (10) di un trasduttore elettroacustico MEMS (11), comprendente integrare in una piastrina (12) di materiale semiconduttore avente un corpo monolitico (13) con una

superficie anteriore (13a) ed una superficie posteriore (13b) estendentisi in un piano orizzontale (xy): una cornice (14); un elemento attuatore (15) disposto in un'apertura centrale (16) definita da detta cornice (14); elementi a sbalzo (18), accoppiati in corrispondenza di detta superficie anteriore (13a) tra detto elemento attuatore (15) e detta cornice (14); e regioni piezoelettriche (19) sovrapposte a detti elementi a sbalzo (18) ed atte ad essere polarizzate per causare una deformazione di detti elementi a sbalzo (18) per effetto piezoelettrico,

caratterizzato dal fatto di comprendere integrare in detta piastrina (12) una prima disposizione di arresto (30) atta ad interagire con detti elementi a sbalzo (18) per limitarne un movimento in una prima direzione di un asse verticale (z) ortogonale a detto piano orizzontale (xy), verso la sottostante apertura centrale (16).

16. Procedimento secondo la rivendicazione 15, in cui detta fase di integrare comprende:

predisporre una fetta (45) di materiale semiconduttore avente una superficie anteriore (45a) ed una superficie posteriore (45b);

formare una regione di ossido sepolta (52) separata da detta superficie anteriore (45a) da una membrana (49) ed avente una prima larghezza (L1) lungo un primo asse orizzontale (x) di detto piano orizzontale (xy);

formare una struttura piezoelettrica (54) al di sopra di detta membrana (49);

attaccare detta struttura piezoelettrica (54) e detta membrana (49) per definire detti elementi a sbalzo (18) e dette regioni piezoelettriche (19);

attaccare in successione detta fetta (45) a partire da detta superficie posteriore (45b), con un primo attacco per formare una cavità profonda (60) che raggiunge detta regione di ossido sepolta (52) avente una seconda larghezza (L2), ed un secondo attacco per formare una cavità superficiale (61) in corrispondenza di detta superficie posteriore (45b) avente una terza larghezza (L3), in cui dette prima (L1) e terza (L3) larghezza sono maggiori della seconda larghezza (L2); e

rimuovere detto ossido di silicio di detta regione di ossido sepolta (52) in modo da liberare una cavità sepolta (50) e rilasciare detti elementi a sbalzo (18) al di sopra di detta cavità sepolta (50).

17. Procedimento secondo la rivendicazione 16, in cui detta fase di rimuovere comprende definire contestualmente in detta fetta (45) detta prima disposizione di arresto (30).

18. Procedimento secondo la rivendicazione 16 o 17, in cui detta fase di attaccare in successione comprende definire contestualmente in detta fetta (45) una seconda disposizione di arresto (32), configurata per limitare un movimento di detti

elementi a sbalzo (18) in una seconda direzione di detto asse verticale (z), in allontanamento dalla sottostante apertura centrale (16); dette prima (30) e seconda (32) disposizione di arresto definendo congiuntamente un meccanismo di arresto bidirezionale lungo detto asse verticale (z) per detta struttura di attuazione (10).

19. Procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 16-18, in cui detta fase di formare una regione di ossido sepolta (52) comprende:

formare la cavità sepolta (50) contenuta in detta fetta (45) e separata da detta superficie anteriore (45a) da detta membrana (49), una porzione di accoppiamento (15') di materiale semiconduttore essendo disposta centralmente rispetto a detta cavità sepolta (50), accoppiata a detta membrana (49); e

formare ossido di silicio in detta cavità sepolta (50), formando detta regione di ossido sepolta (52).

20. Procedimento secondo la rivendicazione 19, in cui formare una cavità sepolta (50) comprende:

scavare, all'interno di detta fetta (45), a partire dalla superficie anteriore (45a), trincee (47) delimitanti fra loro colonne (48) di materiale semiconduttore;

crescere epitassialmente, a partire da dette colonne (48), uno strato di chiusura di materiale semiconduttore,

detto strato di chiusura chiudendo superiormente dette trincee (47); ed

eseguire un trattamento termico tale da causare la migrazione del materiale semiconduttore di dette colonne (48) verso detto strato di chiusura, formando detta cavità sepolta (50) ed inoltre, contestualmente, detta membrana (49) sospesa al di sopra di detta cavità sepolta (50).

21. Procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 16-18, in cui detta fetta è una fetta SOI - Silicon On Insulator - avente uno strato attivo (66), uno strato isolante (67), ed uno strato di supporto (68); ed in cui detta fase di formare una regione di ossido sepolta (52) comprende:

attaccare lo strato attivo (66) e lo strato isolante (67), in modo da definire una regione impilata (69) di porzioni dello strato attivo (66) e dello strato isolante (67);

sottoporre a ricrescita di silicio la superficie anteriore (45a) della fetta (45), così da formare, a partire da detta regione impilata (69), detta regione di ossido sepolto (52) e detta membrana (49) al di sopra di detta regione di ossido sepolto (52).

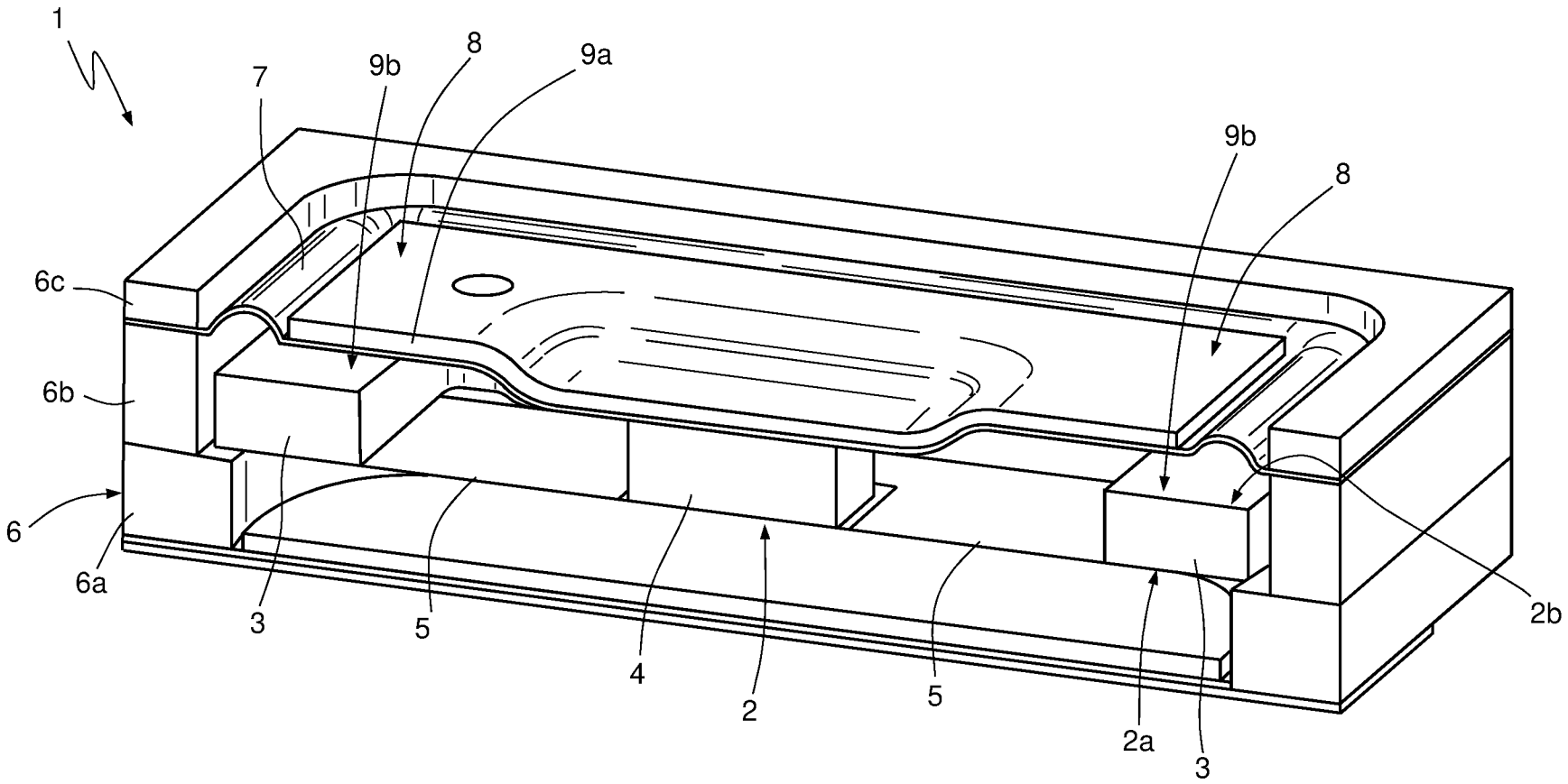


Fig.1

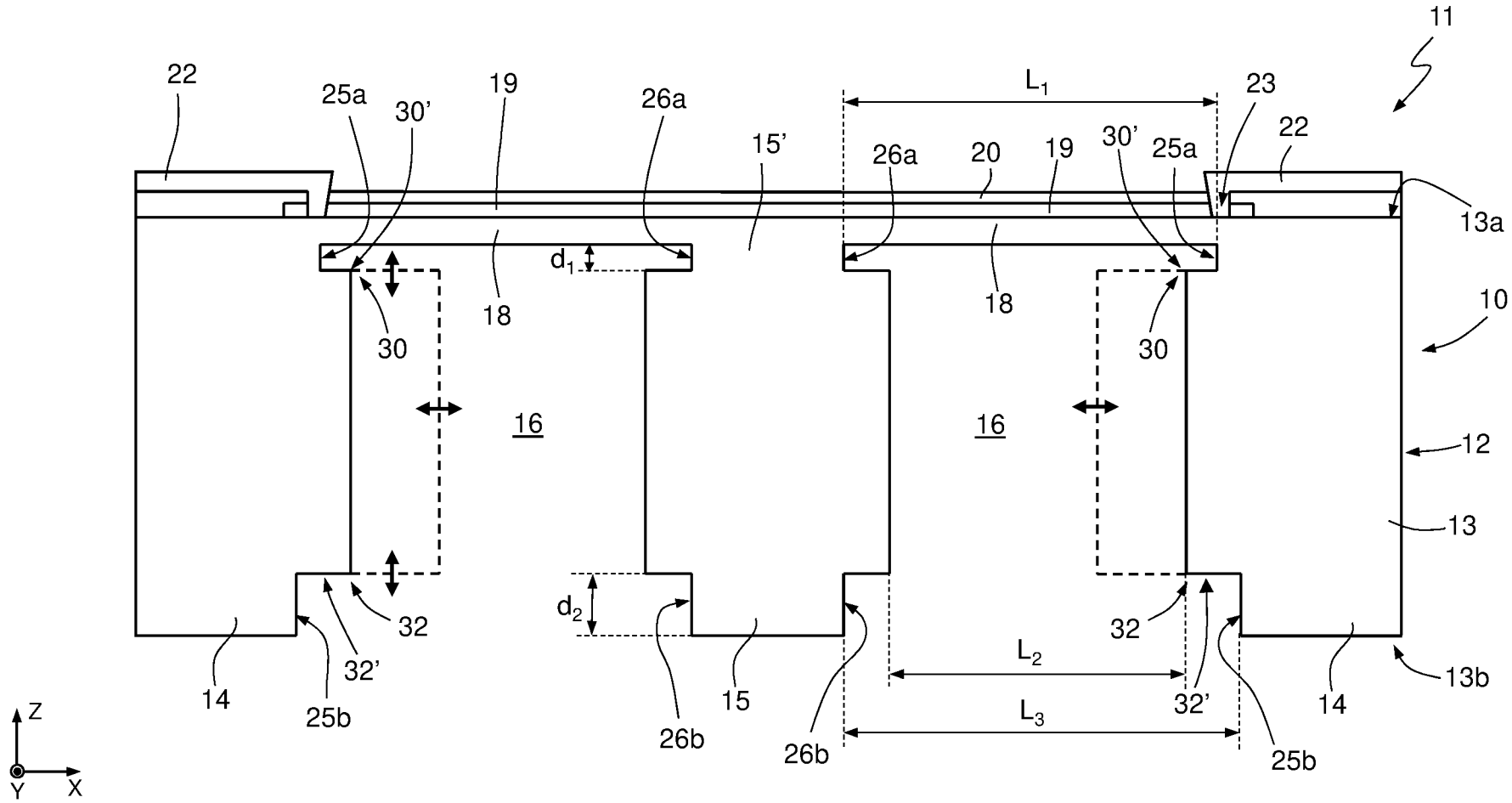

11
22
25a
30'
19
26a
15'
L_1
23
22
26a
20
19
30'
25a
13a
d_1
18
18
30
30
10
16
16
12
13
d_2
32
32
32'
L_2
L_3
14
25b
26b
15
26b
32'
14
25b
13b
Z
Y
X

Fig.2

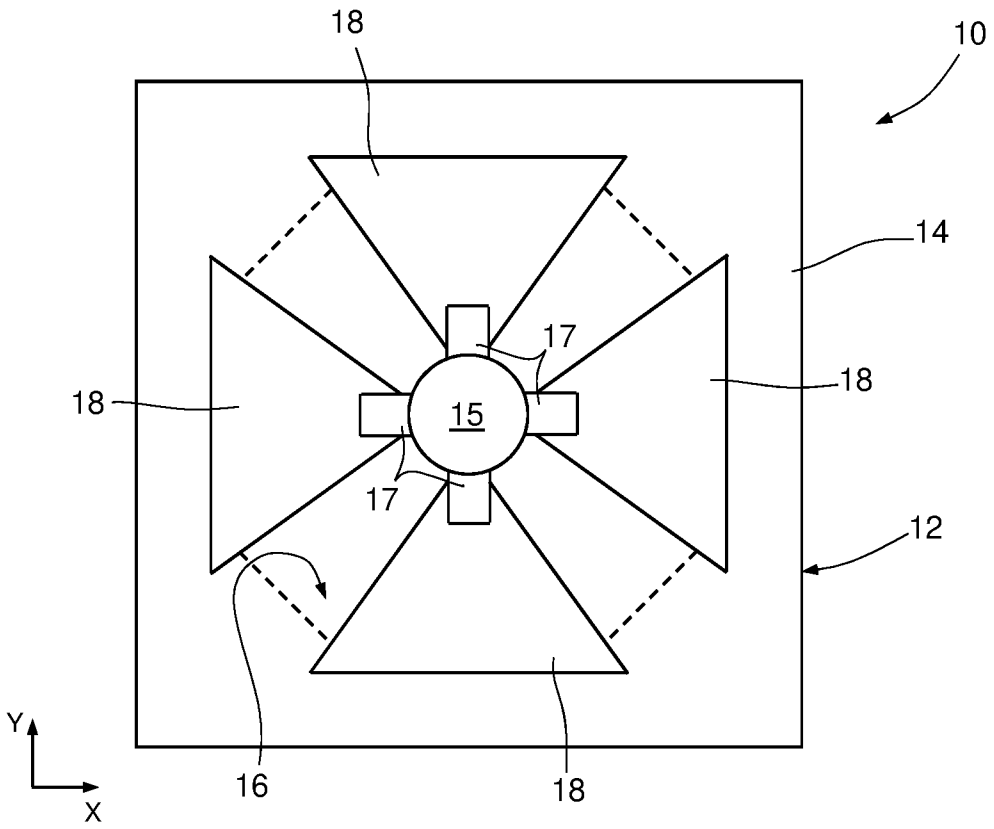

18
10
14
17
18
18
15
17
12
16
18
Y
X

Fig.3

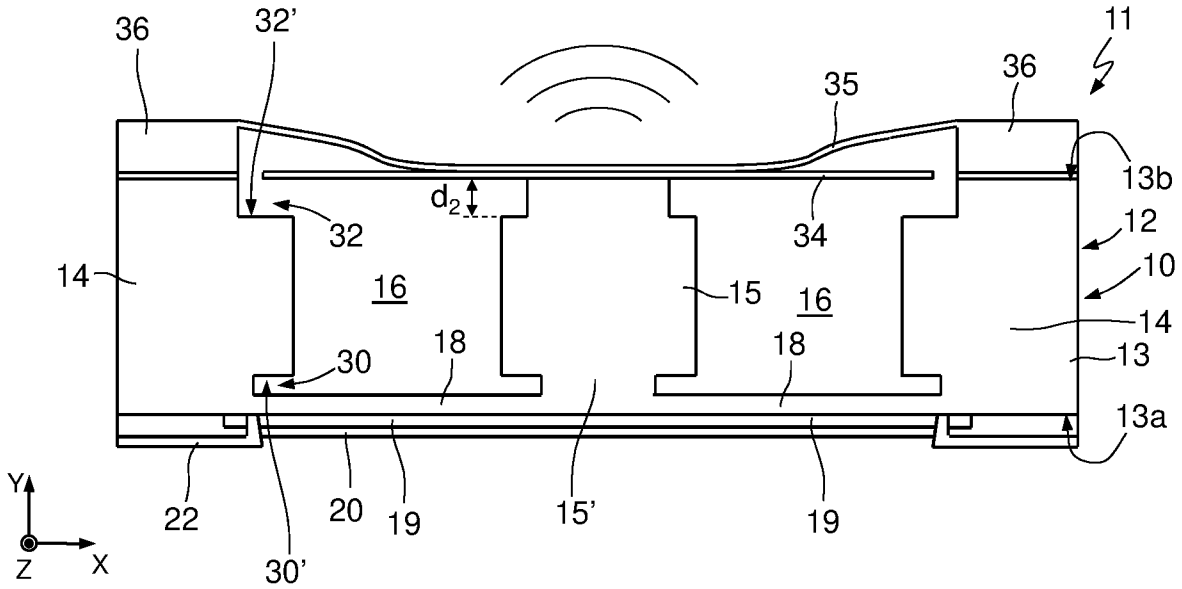

36
32'
11
35
36
13b
d_2
32
34
12
14
16
15
16
10
18
18
14
30
13
13a
Y
22
20
19
15'
19
Z
X
30'

Fig.4

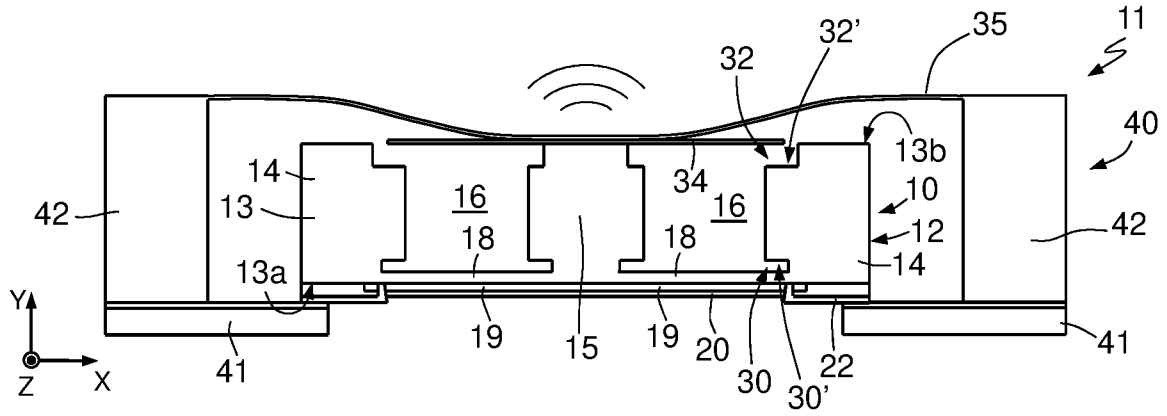


Fig.5

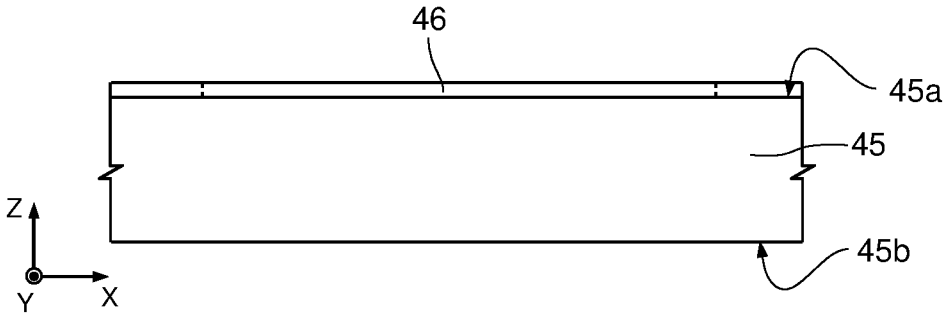


Fig.6A

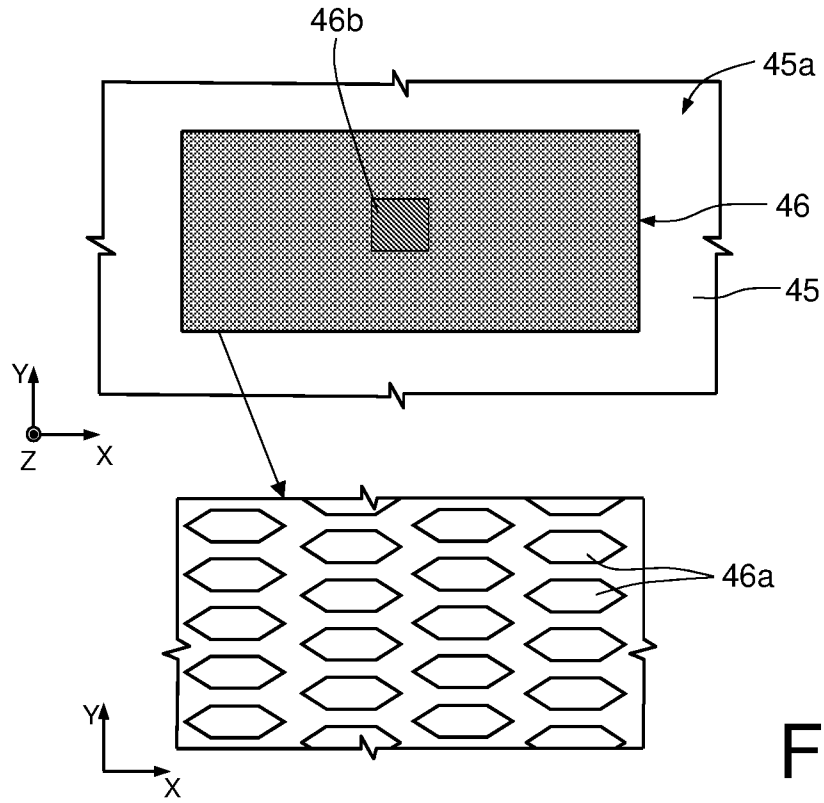


Fig.6B

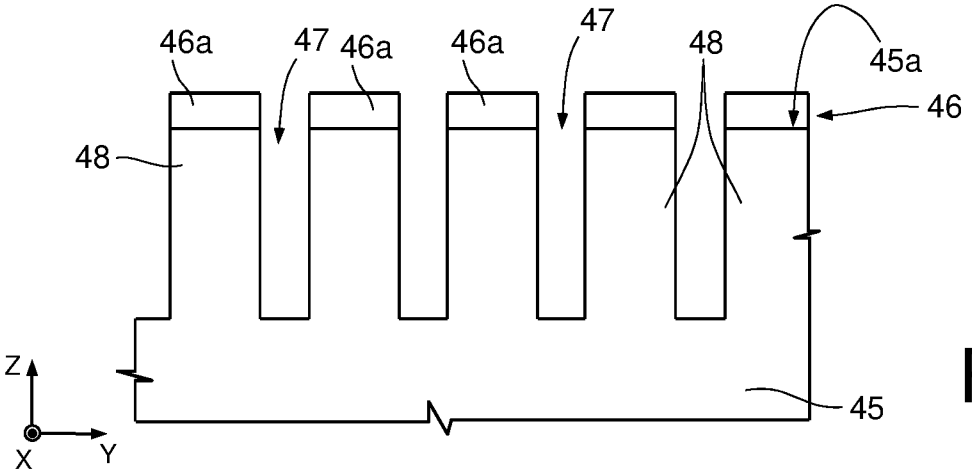


Fig.6C

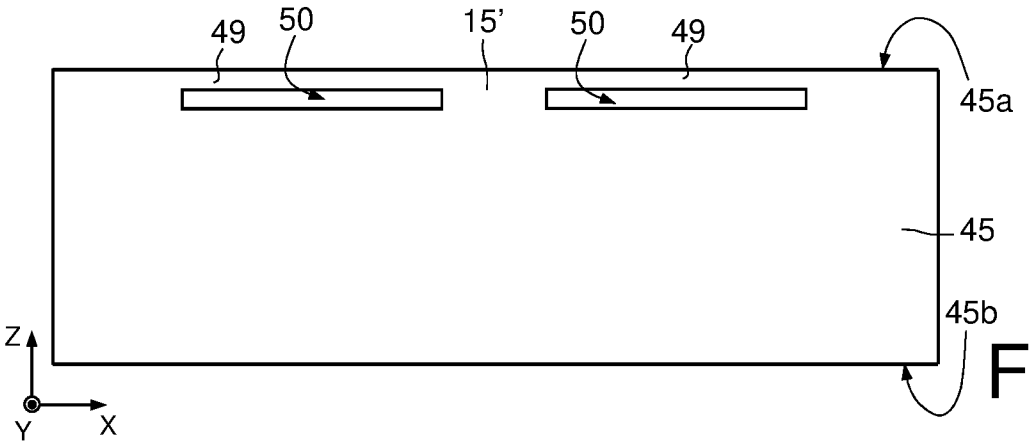


Fig.6D

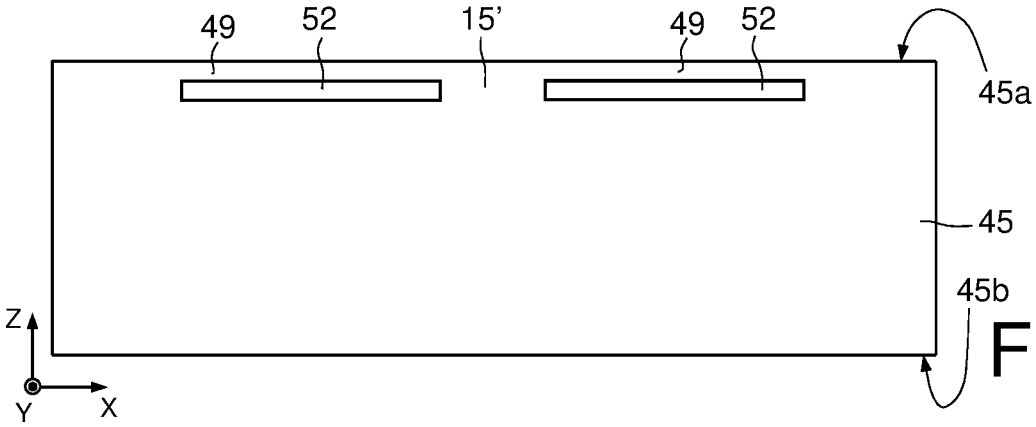


Fig.6E

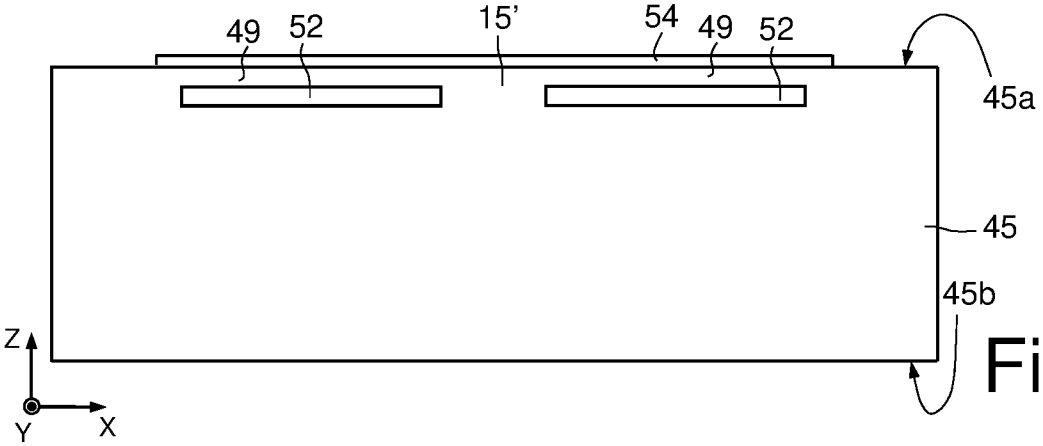


Fig.6F

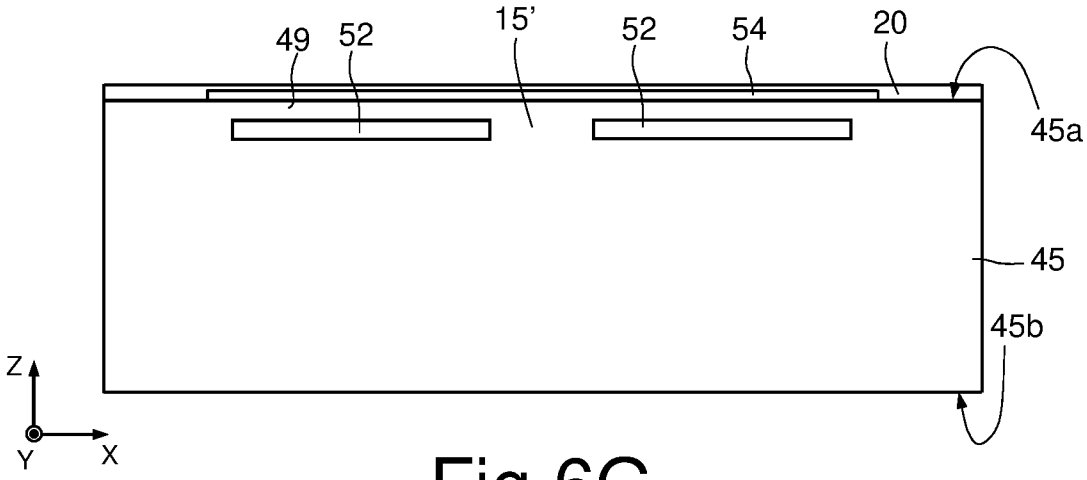


Fig.6G

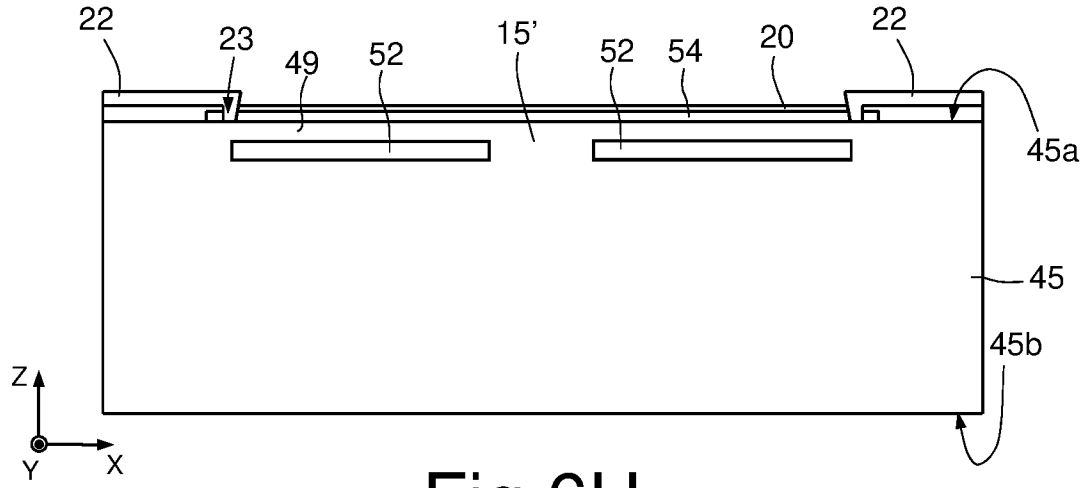


Fig.6H

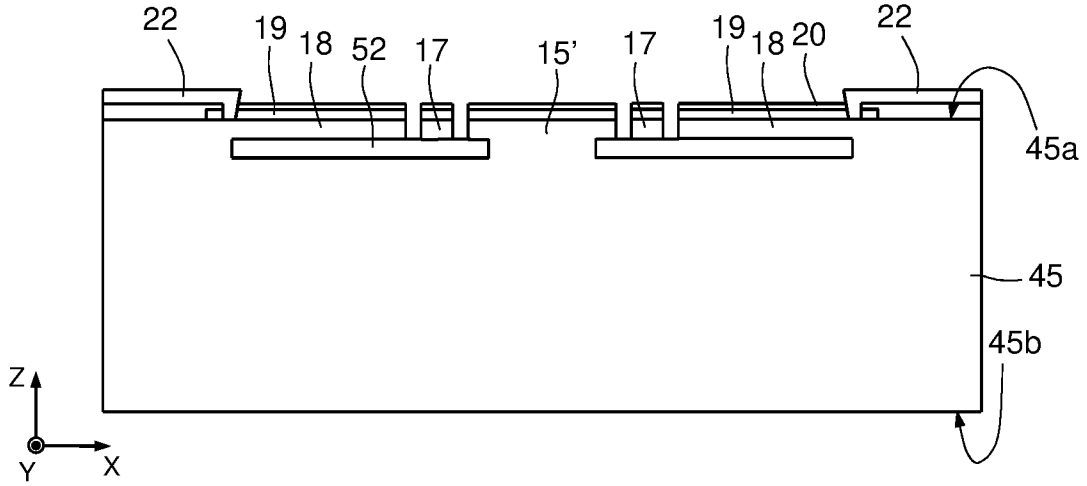


Fig.6I

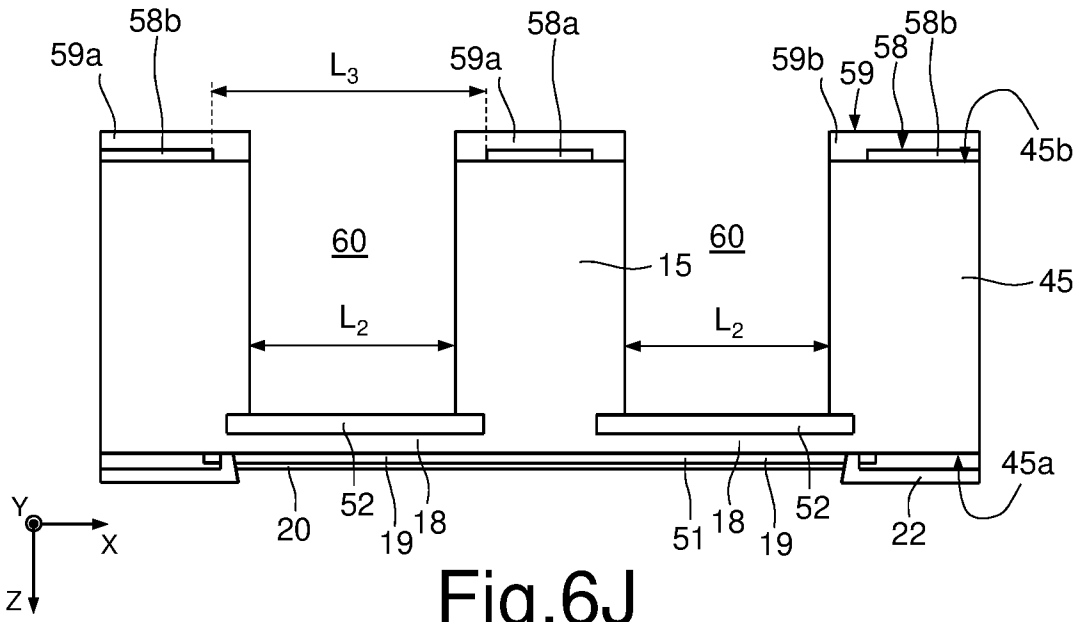


Fig.6J

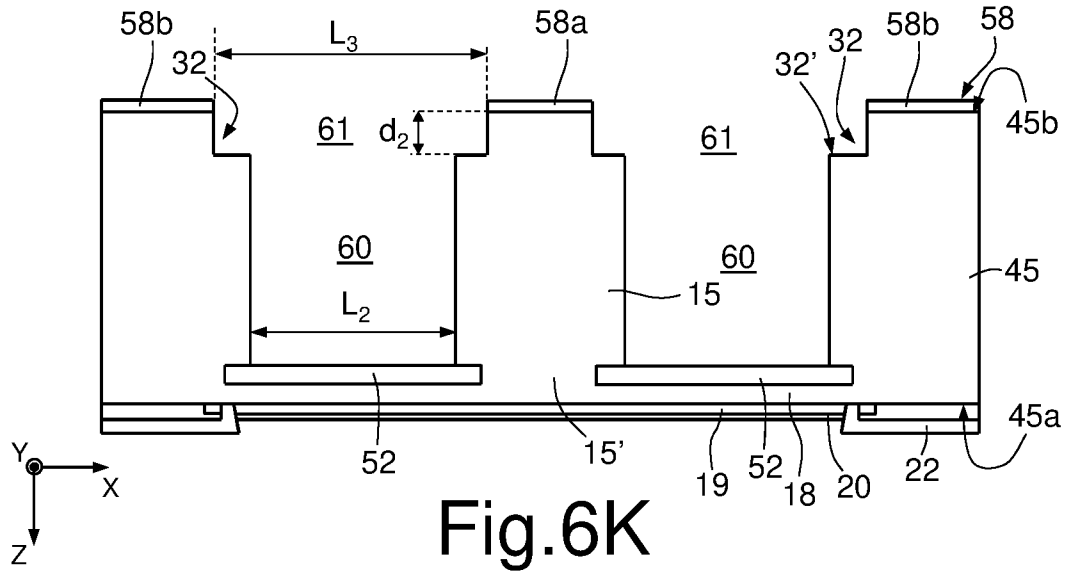


Fig.6K

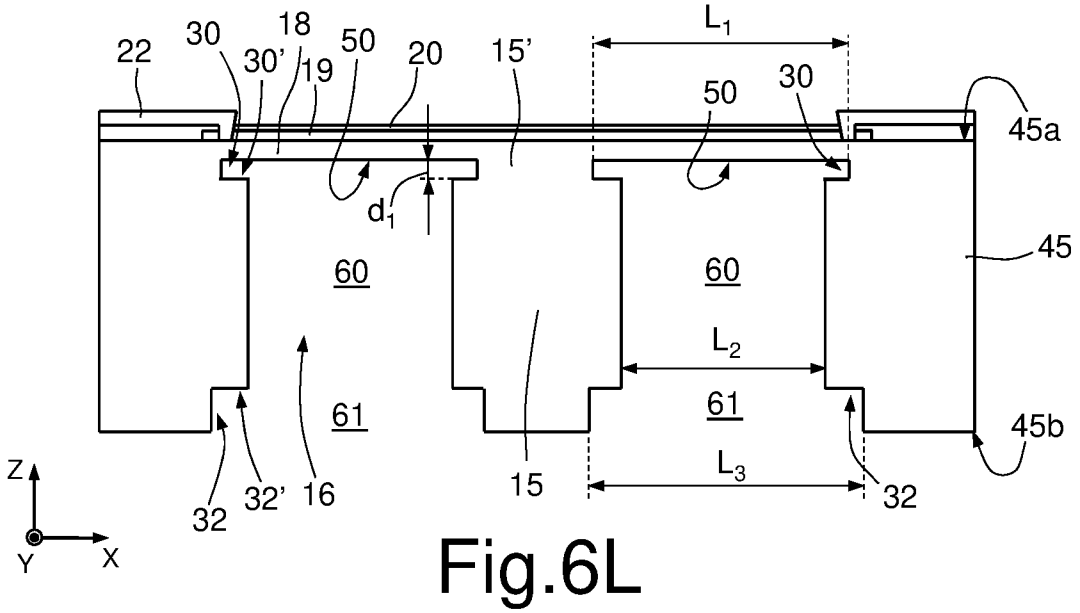


Fig.6L

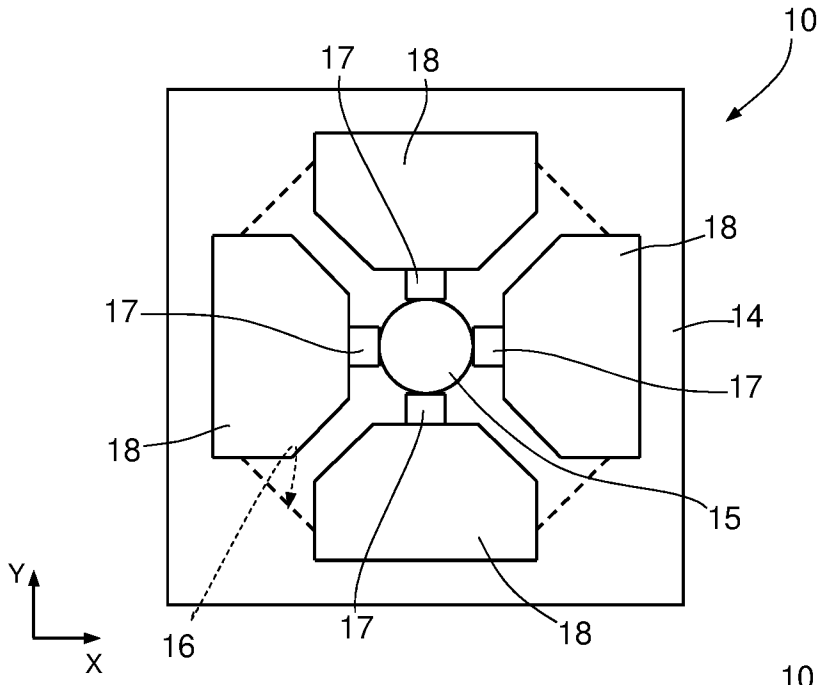


Fig.7A

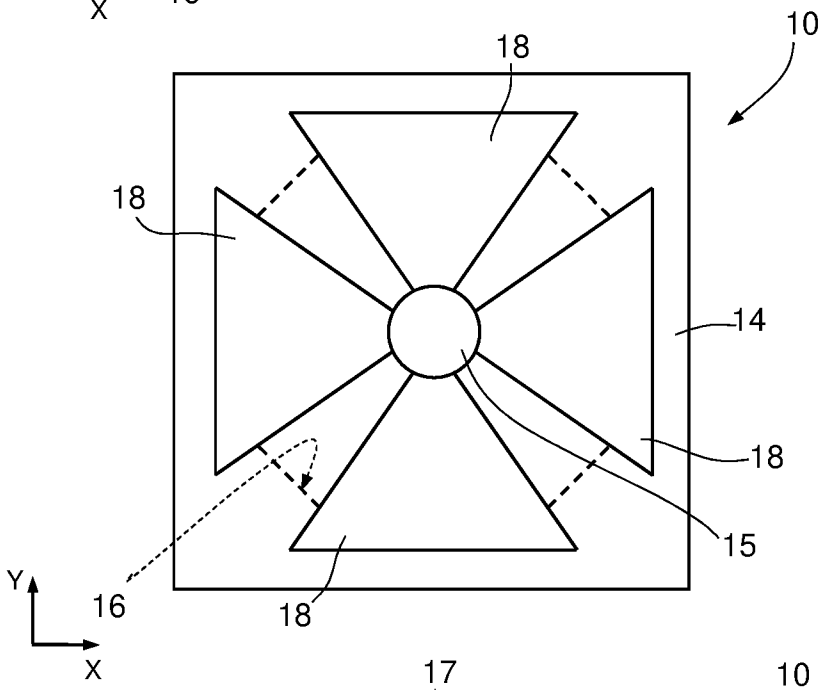


Fig.7B

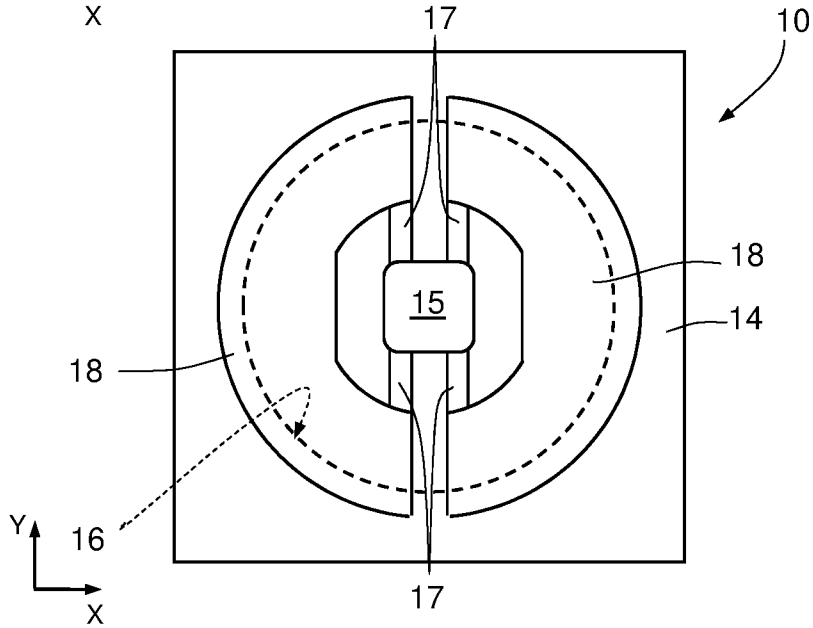


Fig.7C

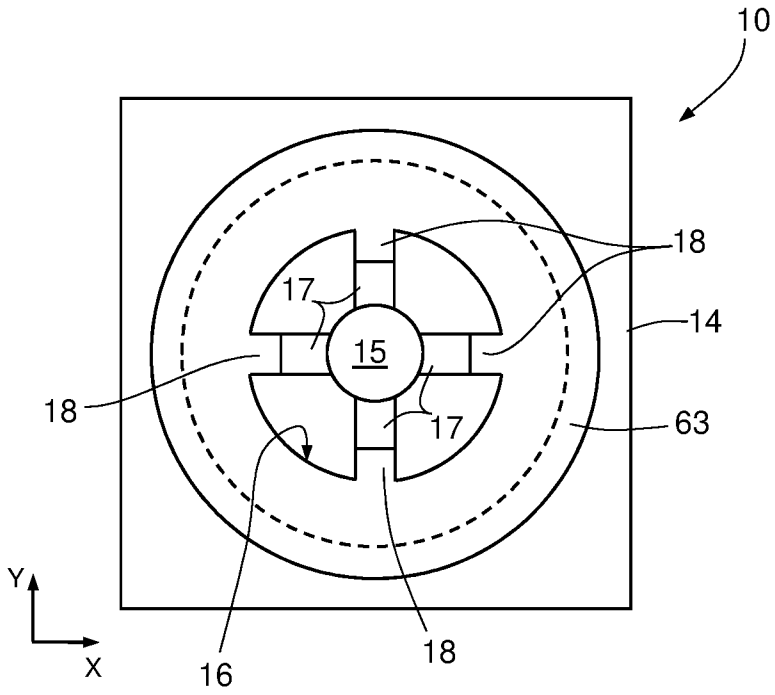


Fig.7D

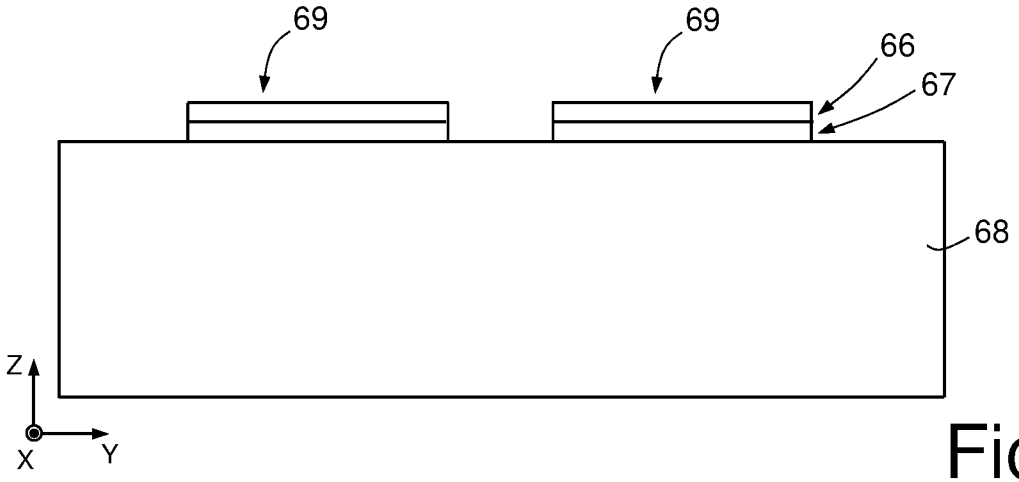


Fig.8A

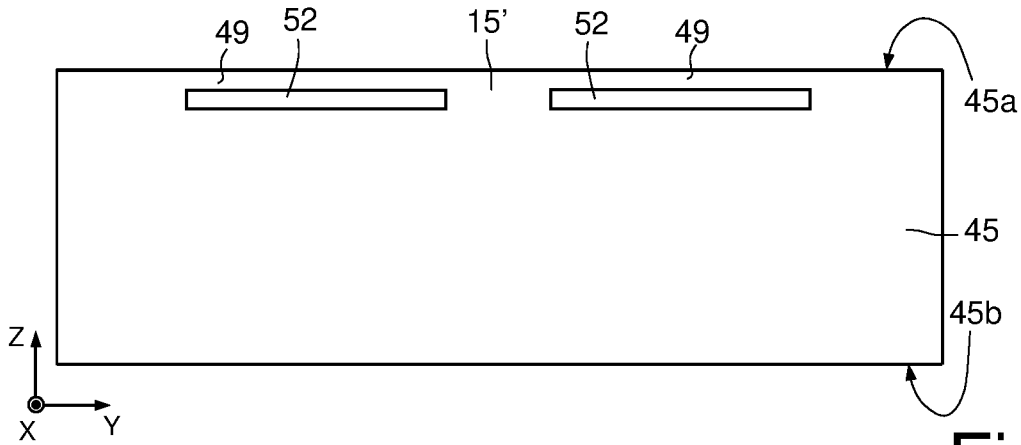


Fig.8B