



Ministero delle Imprese e del Made in Italy
DIREZIONE GENERALE PER LA TUTELA DELLA PROPRIETÀ INDUSTRIALE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHE

UIBM

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102022000014542
Data Deposito	11/07/2022
Data Pubblicazione	11/01/2024

Classifiche IPC

Titolo

DISPOSITIVO MEMS COMPRENDENTE UNA STRUTTURA DEFORMABILE E PROCESSO DI FABBRICAZIONE DEL DISPOSITIVO MEMS

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

“DISPOSITIVO MEMS COMPRENDEnte UNA STRUTTURA DEFORMABILE E
PROCESSO DI FABBRICAZIONE DEL DISPOSITIVO MEMS”

5 di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

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

Inventori: RIANI Manuel, GATTERE Gabriele, VERCESI Federico

* * *

10 La presente invenzione è relativa a un dispositivo MEMS
comprendente una struttura deformabile e ad un processo di
fabbricazione del dispositivo MEMS.

Come noto, i materiali piezoelettrici permettono la
conversione da energia elettrica a energia meccanica e
15 viceversa.

In particolare, sono noti dispositivi MEMS (“Micro
Electro-Mechanical Systems”) che presentano una o più
strutture deformabili (es., strutture sospese su cavità,
quali i cantilever), con strati piezoelettrici (es., il tipo
20 a strato sottile, “thin film”), e che operano come attuatori,
sensori o racimolatori di energia (“energy harvester”).

Infatti, quando i dispositivi MEMS funzionano come
sensori o energy harvester, queste strutture deformabili
vengono meccanicamente deformate in modo elastico a causa di
25 forze esterne agenti su di esse e questo causa rispettive

deformazioni meccaniche elastiche degli strati piezoelettrici che, per effetto piezoelettrico diretto, si polarizzano generando una differenza di potenziale elettrico ai loro capi che viene acquisita per fini di misura
5 (applicazione sensoristica) oppure per pilotare un carico elettrico (applicazione di energy harvesting). Invece, quando i dispositivi MEMS funzionano come attuatori, gli strati piezoelettrici vengono polarizzati elettricamente (es., applicando una differenza di potenziale elettrico ai
10 loro capi) così che essi, per effetto piezoelettrico inverso, si deformino meccanicamente in modo elastico generando una rispettiva deformazione meccanica elastica delle strutture deformabili che fa sì che queste ultime esercitino forze di attuazione sull'ambiente esterno.

15 Un esempio di struttura deformabile di tipo noto compresa in un dispositivo MEMS noto è mostrata in figura 1 con il riferimento 10, in un sistema cartesiano triassiale definito da un asse X, un asse Y e un asse Z, ortogonali fra loro. In dettaglio, la figura 1 mostra la struttura
20 deformabile 10 in una condizione di riposo, cioè in assenza di polarizzazione elettrica fornita o di forza esterna applicata.

In particolare, la struttura deformabile 10 (es., un cantilever) ha estensione principale lungo una direzione di
25 estensione principale (esemplificativamente mostrata

parallela all'asse X in figura 1) e presenta una prima
estremità 10' ed una seconda estremità 10'' opposte fra loro
lungo la direzione di estensione principale. Ad esempio, la
struttura deformabile 10 può esser fissata (dunque
5 vincolata) tramite la prima estremità 10' ad una struttura
di ancoraggio (o struttura fissa) del dispositivo MEMS, non
mostrata, e può esser accoppiata tramite la seconda estremità
10'' ad una massa sismica del dispositivo MEMS, non mostrata
e configurata per oscillare lungo una direzione di
10 oscillazione ortogonale alla direzione di estensione
principale e qui esemplificativamente considerata parallela
all'asse Z.

La struttura deformabile 10 comprende un corpo
principale 12 (di materiale semiconduttore quale silicio)
15 avente una prima superficie 12a e una seconda superficie 12b
opposte fra loro lungo la direzione di oscillazione (cioè
lungo l'asse Z), e una struttura piezoelettrica 14
estendentesi sulla prima superficie 12a. In dettaglio, il
corpo principale 12 è pieno, cioè non presenta cavità
20 sepolte. La seconda superficie 12b forma una superficie
inferiore 10b della struttura deformabile 10 mentre la
struttura piezoelettrica 14 definisce una superficie
superiore 10a della struttura deformabile 10.

In maggior dettaglio ed in modo non mostrato, la
25 struttura piezoelettrica 14 può comprendere un primo

elettrodo ed un secondo elettrodo di materiale conduttivo (es., metallo quale argento o oro) e uno strato piezoelettrico di materiale piezoelettrico (es., PZT) che è interposto, lungo l'asse Z, fra il primo ed il secondo
5 elettrodo. Ad esempio, il primo elettrodo si estende sulla prima superficie 12a fra lo strato piezoelettrico ed il corpo principale 12 mentre il secondo elettrodo si estende da parte opposta dello strato piezoelettrico rispetto al primo elettrodo.

10 La struttura deformabile 10 presenta un piano neutro 16 che è il luogo dei punti in cui la tensione normale conseguente ad un carico di flessione lungo l'asse Z è nulla. In dettaglio, il piano neutro 16 è sostanzialmente coincidente con un piano di mezzeria della struttura
15 deformabile 10, parallelo al piano XY. In altre parole, il piano neutro 16 è sostanzialmente equidistante dalla superficie superiore 10a e dalla superficie inferiore 10b della struttura deformabile 10, visto che generalmente lo spessore lungo l'asse Z della struttura piezoelettrica 14 è
20 molto inferiore (es., minore del 5% circa) dello spessore lungo l'asse Z del corpo principale 12 e le proprietà elastiche della struttura piezoelettrica 14 non differiscono troppo da quelle del corpo principale 12.

Il dispositivo MEMS includente la struttura deformabile
25 10 può quindi esser utilizzato sia come sensore o energy

harvester (acquisendo, fra il primo ed il secondo elettrodo, la differenza di potenziale elettrico indotta nello strato piezoelettrico da parte di forze esterne agenti parallelamente all'asse Z, che causano la deflessione della
5 struttura deformabile 10 lungo l'asse Z) che come attuatore (polarizzando lo strato piezoelettrico per causarne la deformazione e, conseguentemente, la deflessione della struttura deformabile 10 lungo l'asse Z).

La figura 2 mostra invece la struttura deformabile 10
10 in una condizione di deformazione, cioè in presenza di polarizzazione elettrica fornita o di forza esterna applicata. In figura 2 la struttura deformabile 10 è in una posizione di deformazione diversa da una posizione a riposo della struttura deformabile 10 in figura 1. Nell'esempio
15 mostrato in figura 2 in cui la prima estremità 10' è vincolata alla struttura di ancoraggio mentre la seconda estremità 10'' è libera di oscillare (es., oscilla a causa del movimento oscillatorio della massa sismica ad essa accoppiata e forma dunque una punta del cantilever), la prima
20 estremità 10' è nella stessa posizione della condizione a riposo mentre la seconda estremità 10'' è in una posizione diversa da quella della condizione a riposo ed in particolare presenta uno spostamento (o freccia meccanica) Z' lungo l'asse Z. In altre parole, la struttura deformabile 10 è
25 deflessa lungo l'asse Z (cioè presenta un momento flettente

lungo l'asse Z) in modo tale da causare lo spostamento Z' della seconda estremità 10" lungo l'asse Z e dunque una rotazione della struttura deformabile 10 attorno all'asse Y, identificata in figura 2 tramite un angolo di rotazione θ .

5 In dettaglio, nella condizione di riposo le estremità 10' e 10" sono reciprocamente allineate lungo l'asse Z mentre nella condizione di deformazione le estremità 10' e 10" sono reciprocamente disallineate lungo l'asse Z (cioè hanno quota diversa fra loro lungo l'asse Z) e distano fra loro, lungo

10 l'asse Z, di una distanza di deformazione (o, più semplicemente, deformazione) pari allo spostamento Z' ; inoltre, l'angolo di rotazione θ è ad esempio definito fra un asse parallelo all'asse X e un asse tangente alla seconda estremità 10" della struttura deformabile 10.

15 Come noto, l'efficacia di questo dispositivo MEMS nella conversione di energia, sia che esso operi come attuatore (energia elettrica a energia meccanica) che come sensore o energy harvester (energia meccanica a energia elettrica), è espressa tramite un fattore (o coefficiente, parametro) di

20 accoppiamento elettromeccanico ("electromechanical coupling factor", EMCF) ψ . In particolare, quando il dispositivo MEMS opera come attuatore vale la relazione matematica $Z' \propto \psi \cdot \Delta V$ (dove ΔV è la differenza di tensione elettrica fornita ai capi dello strato piezoelettrico, ψ è l'EMCF e Z' è lo

25 spostamento generato per effetto piezoelettrico inverso) e

quando il dispositivo MEMS opera come sensore o energy harvester vale la relazione matematica $Q \propto \psi \cdot Z'$ (dove Z' è lo spostamento causato dalle forze esterne agenti lungo l'asse Z , ψ è l'EMCF e Q è la carica generata per effetto piezoelettrico diretto). Di conseguenza, quando il dispositivo MEMS opera come attuatore lo spostamento Z' è proporzionale all'EMCF ψ , quando il dispositivo MEMS opera come sensore la corrente di rilevamento generata dal dispositivo MEMS è proporzionale all'EMCF ψ e quando il dispositivo MEMS opera come energy harvester la potenza elettrica generata dal dispositivo MEMS è proporzionale al quadrato della corrente di carico generata dal dispositivo MEMS (dove la corrente di carico è proporzionale all'EMCF ψ) e dunque è proporzionale al quadrato dell'EMCF ψ .

Risulta dunque evidente come aumentare l'EMCF ψ permette di ottimizzare il funzionamento del dispositivo MEMS. Tuttavia, è noto che aumentare l'EMCF ψ pone una serie di difficoltà.

Infatti, vale la seguente relazione matematica:

$$\psi = e_{zx} \cdot h_{piezo-neutrax} \cdot \frac{1}{L_{beam}} \cdot \frac{d\theta}{dZ} \cdot A_{cap}, \quad \text{con } \sigma = \frac{1}{L_{beam}} \cdot \frac{d\theta}{dZ}$$

dove e_{zx} è una costante piezoelettrica effettiva trasversale della struttura deformabile 10, $h_{piezo-neutrax}$ è la distanza fra la struttura piezoelettrica 14 e il piano neutro 16 (es., misurata fra il piano neutro 16 e la superficie del

secondo elettrodo che è opposta lungo l'asse Z allo strato piezoelettrico rispetto al secondo elettrodo), L_{beam} è la lunghezza massima della struttura deformabile 10 lungo l'asse X, $d\theta/dZ$ è la rotazione della seconda estremità 10" 5 attorno all'asse Y indotta dallo spostamento Z' e A_{cap} è l'area (misurata parallelamente ad un piano XY definito dagli assi X e Y) del condensatore formato dalla struttura piezoelettrica 14.

Per aumentare l'EMCF ψ è possibile aumentare i seguenti 10 parametri:

- e_{zx} , trovando nuovi materiali con cui realizzare la struttura deformabile 10;

- σ , dipende dal modo in cui si piega la struttura deformabile 10, può essere ottimizzato ma è sempre in trade-off con altri parametri importanti della struttura deformabile 10 (es., A_{cap} , frequenza di oscillazione della struttura deformabile 10, banda di fondo scala del dispositivo MEMS);

- A_{cap} , aumentando l'area dedicata alla struttura piezoelettrica 14, sebbene richieda un corrispondente incremento delle dimensioni del dispositivo MEMS e causi variazioni in parametri importanti della struttura deformabile 10 (es., frequenza di oscillazione della struttura deformabile 10, banda di fondo scala del 25 dispositivo MEMS);

- $h_{piezo-neutrax}$, tuttavia al crescere dello spessore lungo l'asse Z del corpo principale 12 (fatto di materiale solido quale silicio) cresce anche la rigidezza e quindi la frequenza di risonanza del dispositivo MEMS, causando una
5 riduzione dell'efficacia di funzionamento del dispositivo MEMS.

Generalmente le soluzioni note che permettono di migliorare l'EMCF ψ sfruttano modifiche ai materiali o ottimizzazioni del design della struttura deformabile 10. Ad
10 esempio, questo include sviluppare nuovi materiali piezoelettrici ad alte prestazioni (es., drogare AlN con scandio oppure PZT con niobio o manganese) oppure migliorare il design per aumentare la sensibilità del dispositivo MEMS (es., forma della struttura deformabile 10 che è rastremata
15 verso la seconda estremità 10"). Tuttavia, l'utilizzo di nuovi materiali richiede un considerevole sforzo di ricerca e sviluppo, sia in termini economici che di tempistiche, e l'ottimizzazione del design potrebbe avere un effetto diverso a seconda dell'effettiva applicazione del
20 dispositivo MEMS, determinando l'insorgere di compromessi su parametri o proprietà rilevanti del dispositivo MEMS (es., tra sensibilità e robustezza e tra banda di fondo scala e deformazione massima).

Scopo della presente invenzione è fornire un
25 dispositivo MEMS e un processo di fabbricazione del

dispositivo MEMS, che superino gli inconvenienti dell'arte nota.

Secondo la presente invenzione vengono realizzati un dispositivo MEMS e un processo di fabbricazione del
5 dispositivo MEMS, come definiti nelle rivendicazioni annesse.

Per una migliore comprensione della presente invenzione viene ora descritta una forma di realizzazione preferita, a puro titolo di esempio non limitativo, con riferimento ai
10 disegni allegati, nei quali:

- la figura 1 è una vista in sezione longitudinale di una struttura deformabile di tipo noto di un dispositivo MEMS, in una condizione di riposo della struttura deformabile;

15 - la figura 2 è una vista in sezione longitudinale della struttura deformabile di figura 1, in una condizione di deformazione della stessa;

- la figura 3 è una vista in sezione longitudinale (presa lungo una linea di sezione A-A mostrata in figura 6)
20 di un dispositivo MEMS comprendente una struttura deformabile, in una condizione di riposo della struttura deformabile e secondo una forma di realizzazione del dispositivo MEMS;

- la figura 4 è una vista in sezione longitudinale
25 (presa lungo la linea di sezione A-A) della struttura

deformabile di figura 3, nella sua condizione di riposo;

- la figura 5 è una vista in sezione trasversale (presa lungo una linea di sezione B-B mostrata in figura 6) della struttura deformabile di figura 3, secondo una forma di realizzazione del dispositivo MEMS;

- la figura 6 è una vista dall'alto con parti rimosse del dispositivo MEMS di figura 3, secondo una forma di realizzazione dello stesso;

- la figura 7 è una vista in sezione longitudinale (presa lungo la linea di sezione A-A) del dispositivo MEMS di figura 6, comprendente inoltre una massa sismica accoppiata alla struttura deformabile, nella condizione di riposo della struttura deformabile e secondo una forma di realizzazione del dispositivo MEMS; e

- le figure 8A-8I mostrano, in vista in sezione longitudinale lungo la linea di sezione A-A, rispettive fasi di un processo di fabbricazione del dispositivo MEMS di figura 6, secondo una forma di realizzazione.

In particolare, le figure sono mostrate con riferimento ad un sistema cartesiano triassiale definito da un asse X (o primo asse X), un asse Z (o secondo asse Z) e un asse Y (o terzo asse Y), ortogonali fra loro.

Nella descrizione che segue, elementi comuni alle diverse forme di realizzazione sono stati indicati con gli stessi numeri di riferimento.

La figura 3 mostra un dispositivo MEMS ("Micro Electro-Mechanical Systems") 30 formato in un corpo semiconduttore 31 (di materiale semiconduttore quale silicio) del dispositivo MEMS 30.

5 Il corpo semiconduttore 31 definisce una struttura di ancoraggio (o struttura fissa, struttura di supporto) 32 che delimita lateralmente una cavità principale 57 (es., affacciata ad una superficie inferiore 31a del corpo semiconduttore 31).

10 Il dispositivo MEMS 30 comprende inoltre una o più strutture deformabili 50 accoppiate alla struttura di ancoraggio 32 e sospese elasticamente sulla cavità principale 57. Nel seguito si fa esemplificativamente riferimento al caso in cui il dispositivo MEMS 30 comprende
15 una sola struttura deformabile 50 (anche chiamata prima struttura deformabile), sebbene sia evidente che il dispositivo MEMS 30 può analogamente comprendere più strutture deformabili 50 (es., la prima struttura deformabile e una o più seconde strutture deformabili,
20 analoghe alla prima struttura deformabile).

In dettaglio, la figura 3 è una sezione longitudinale (es., presa lungo la linea di sezione A-A mostrata in figura 6) che mostra, in un piano XZ definito dagli assi X e Z, la struttura deformabile 10 in una condizione di riposo, cioè
25 in assenza di polarizzazione elettrica fornita o di forza

esterna applicata e dunque in assenza di deformazione.

La struttura deformabile 50 (es., un cantilever) ha estensione principale lungo una direzione di estensione principale (in figura 3 esemplificativamente mostrata
5 parallela all'asse X ed indicata con il riferimento 55) e presenta una prima estremità 50' ed una seconda estremità 50" opposte fra loro lungo la direzione di estensione principale 55.

In dettaglio, la struttura deformabile 50 è fissata
10 tramite la prima estremità 50' alla struttura di ancoraggio 32 in modo tale da esser sospesa sulla cavità principale 57 ed avere la seconda estremità 50" che può oscillare lungo una direzione di oscillazione ortogonale alla direzione di estensione principale e qui esemplificativamente considerata
15 parallela all'asse Z. In maggior dettaglio, la struttura deformabile 50 e la struttura di ancoraggio 32 sono monolitiche.

La struttura deformabile 50 può inoltre esser accoppiata tramite la seconda estremità 50" ad una massa
20 sismica del dispositivo MEMS 30 (opzionale e non mostrata nella presente figura, ma mostrata in figura 6 con il riferimento 72), configurata per oscillare anch'essa lungo la direzione di oscillazione.

In particolare, la struttura deformabile 50 comprende
25 un corpo principale 52 (di materiale semiconduttore quale

silicio) avente una prima superficie esterna 52a e una seconda superficie esterna 52b opposte fra loro lungo la direzione di oscillazione (cioè lungo l'asse Z), e una struttura piezoelettrica 54 estendentesi sulla prima
5 superficie esterna 52a. La seconda superficie esterna 52b forma una superficie inferiore 50b della struttura deformabile 50 mentre la struttura piezoelettrica 54 definisce una superficie superiore 50a della struttura deformabile 50.

10 In maggior dettaglio e come meglio mostrato in figura 4 (sezione longitudinale lungo la linea di sezione A-A), la struttura piezoelettrica 54 può comprendere un primo elettrodo 60 ed un secondo elettrodo 61 di materiale conduttivo (es., metallo quale argento o oro) e uno strato
15 piezoelettrico 62 di materiale piezoelettrico (es., PZT) che è interposto, lungo l'asse Z, fra il primo ed il secondo elettrodo 60, 61. Ad esempio, il primo elettrodo 60 si estende sulla prima superficie esterna 52a fra lo strato piezoelettrico 62 ed il corpo principale 52 mentre il secondo
20 elettrodo 61 si estende da parte opposta dello strato piezoelettrico 62 rispetto al primo elettrodo 60.

Con riferimento nuovamente alla figura 3, il corpo principale 52 comprende una o più cavità sepolte 65 estendentisi in corrispondenza della prima superficie
25 esterna 52a del corpo principale 52. Nel seguito si fa

esemplificativamente riferimento al caso in cui è presente una cavità sepolta 65 (anche chiamata prima cavità sepolta), ciononostante è evidente che possono analogamente esser presenti più cavità sepolte 65 (es., oltre alla prima cavità sepolta anche una o più seconde cavità sepolte analoghe alla prima cavità sepolta ed affiancate (cioè disposte lateralmente) alla prima cavità sepolta, lungo l'asse X o Y, in modo da esser anch'esse allineate lungo l'asse Z con la struttura piezoelettrica 54).

10 In particolare, la cavità sepolta 65 è verticalmente allineata (cioè allineata lungo l'asse Z) alla struttura piezoelettrica 54. Ad esempio, la cavità sepolta 65 è disposta centralmente rispetto alla struttura piezoelettrica 54 (cioè un centro della cavità sepolta 65 e un baricentro della struttura piezoelettrica 54 e, più in dettaglio, dello strato piezoelettrico 62, sono reciprocamente allineati lungo l'asse Z). Nell'esempio mostrato nelle figure 3 e 4 la cavità sepolta 65 ha una larghezza massima L_c , misurata lungo l'asse X, che è minore di una larghezza massima L_p , misurata lungo l'asse X, della struttura piezoelettrica 54 (es., dello strato piezoelettrico 62); ciononostante, la larghezza massima L_c può anche esser maggiore della, o uguale alla, larghezza massima L_p .

25 La cavità sepolta 65 si estende nel corpo principale 52 in modo da esser sepolta nel corpo principale 52. In

particolare, il corpo principale 52 comprende una porzione inferiore (o prima porzione di corpo principale) 52' e una porzione superiore (o seconda porzione di corpo principale) 52'' che sono opposte fra loro lungo l'asse Z rispetto alla
5 cavità sepolta 65 e che delimitano lungo l'asse Z la cavità sepolta 65. La porzione superiore 52'' e la porzione inferiore 52' del corpo principale 52 definiscono rispettivamente una prima e una seconda superficie interna 65a, 65b del corpo principale 52, che sono affacciate alla cavità sepolta 65 ed
10 opposte fra loro lungo l'asse Z relativamente alla cavità sepolta 65 in modo da delimitare lungo l'asse Z la cavità sepolta 65 e da formare rispettivamente una parete superiore e una parete inferiore della cavità sepolta 65. In particolare, la cavità sepolta 65 è lateralmente delimitata
15 (cioè parallelamente al piano XY) da porzioni laterali 52''' del corpo principale 52, mostrate in figura 4, che uniscono fra loro la porzione superiore 52'' e la porzione inferiore 52' del corpo principale 52.

La cavità sepolta 65 si estende nel corpo principale
20 52 in modo da esser più vicina alla prima superficie esterna 52a del corpo principale 52 che alla seconda superficie esterna 52b del corpo principale 52. In altre parole, uno spessore massimo D_1 della porzione superiore 52'' del corpo principale 52, misurato lungo l'asse Z, è minore di uno
25 spessore minimo D_2 della porzione inferiore 52' del corpo

principale 52 lungo l'asse Z.

Più in dettaglio, la prima superficie interna 65a dista dalla prima superficie esterna 52a del corpo principale 52 al massimo di una distanza massima D_1 (che è lo spessore massimo lungo l'asse Z della porzione superiore 52" del corpo principale 52) e la seconda superficie interna 65b dista dalla seconda superficie esterna 52b del corpo principale 52 al minimo di una distanza minima D_2 (che è lo spessore minimo lungo l'asse Z della porzione inferiore 52' del corpo principale 52), con $D_1 < D_2$. Ad esempio, la cavità sepolta 65 presenta un'altezza massima H , misurata lungo l'asse Z (es., fra la prima e la seconda superficie interna 65a, 65b), che è compresa fra circa $2 \mu\text{m}$ e circa $80 \mu\text{m}$; inoltre, lo spessore massimo D_1 può esser compreso fra circa $2 \mu\text{m}$ e circa $80 \mu\text{m}$ e lo spessore minimo D_2 può esser compreso fra circa $4 \mu\text{m}$ e circa $82 \mu\text{m}$ in modo tale per cui la somma di D_1 , H e D_2 è ad esempio minore di circa $85 \mu\text{m}$. Ad esempio: $D_1=5\mu\text{m}$, $H=10\mu\text{m}$, $D_2=15\mu\text{m}$; $D_1=4\mu\text{m}$, $H=20\mu\text{m}$, $D_2=20\mu\text{m}$; $D_1=2\mu\text{m}$, $H=5\mu\text{m}$, $D_2=10\mu\text{m}$.

La struttura deformabile 50 presenta un piano neutro. Con piano neutro si intende il luogo dei punti in cui la tensione normale conseguente ad un carico di flessione lungo l'asse Z è nulla. In altre parole, in caso di deformazione meccanica della struttura deformabile 50, lo stress e la deformazione sono nulli lungo il piano neutro (che dunque unisce i punti della struttura deformabile 50 che, in caso

di deformazione di quest'ultima lungo l'asse Z, non subiscono
alcuno stress o deformazione longitudinale). In assenza di
deformazione della struttura deformabile 50, il piano neutro
è parallelo ad un piano XY definito dagli assi X e Y e dunque
5 è ortogonale all'asse Z. Nelle viste in sezione longitudinale
delle figure 3 e 4, il piano neutro è mostrato tramite un
asse neutro corrispondente all'intersezione del piano neutro
con il piano XZ della sezione mostrata, ed è indicato con il
riferimento 56. Come si vede, l'asse neutro è parallelo o
10 coincidente con la direzione di estensione principale 55
(nella figura 3 è esemplificativamente mostrato coincidente
con la direzione di estensione principale 55), dunque è
parallelo all'asse X.

Inoltre, la struttura deformabile 50 presenta un piano
15 di mezzeria che, in assenza di deformazione della struttura
deformabile 50, è parallelo al piano XY. In particolare, il
piano di mezzeria è equi spaziato rispetto alla superficie
superiore 50a e alla superficie inferiore 50b della struttura
deformabile 50. In altre parole, in assenza di deformazione
20 della struttura deformabile 50, il piano di mezzeria dista
dalla superficie superiore 50a della struttura deformabile
50 di una prima distanza di mezzeria D_{m1} e dista dalla
superficie inferiore 50b della struttura deformabile 50 di
una seconda distanza di mezzeria D_{m2} uguale alla prima
25 distanza di mezzeria D_{m1} . Nelle viste in sezione

longitudinale delle figure 3 e 4, il piano di mezzeria è mostrato tramite un asse di mezzeria corrispondente all'intersezione del piano di mezzeria con il piano XZ della sezione mostrata, ed è indicato con il riferimento 58. Come
5 si vede, l'asse di mezzeria è parallelo o coincidente con la direzione di estensione principale 55 (nella figura 3 è esemplificativamente mostrato come parallelo e non coincidente con la direzione di estensione principale 55), dunque è parallelo all'asse X.

10 Il piano neutro 56 e il piano di mezzeria 58 non coincidono fra loro, dunque in assenza di deformazione della struttura deformabile 50 essi sono paralleli e non coincidenti. In altre parole, in assenza di deformazione della struttura deformabile 50, il piano neutro 56 dista
15 dalla superficie superiore 50a della struttura deformabile 50 di una prima distanza neutra D_{n1} e dista dalla superficie inferiore 50b della struttura deformabile 50 di una seconda distanza neutra D_{n2} diversa dalla prima distanza neutra D_{n1} . In particolare, $D_{n1} \neq D_{m1}$ e $D_{n2} \neq D_{m2}$ e, in maggior dettaglio,
20 $D_{n1} > D_{n2}$. Questo è dovuto al fatto che la cavità sepolta 65 posta in corrispondenza della superficie superiore 50a della struttura deformabile 50 sposta il piano neutro 56 al di sotto del piano di mezzeria 58 (cioè verso la superficie inferiore 50b della struttura deformabile 50), a causa
25 dell'assenza di materiale solido nella cavità sepolta 65.

In dettaglio, la prima distanza neutra D_{n1} è la distanza fra la struttura piezoelettrica 54 e il piano neutro 56, precedentemente indicata come $h_{piezo-neutrax}$. Di conseguenza, la presenza della cavità sepolta 65 permette di aumentare
5 $h_{piezo-neutrax}$ e dunque di aumentare l'EMCF ψ (calcolato come precedentemente descritto) rispetto al caso in cui non è presente la cavità sepolta 65. Tuttavia, poiché la cavità sepolta 65 presenta vuoto o aria (ma comunque non è riempita con materiale solido quale silicio), questo aumento di
10 $h_{piezo-neutrax}$ non incide sulla rigidezza flessionale della struttura deformabile 50, che dunque rimane costante. Di conseguenza, la presenza della cavità sepolta 65 permette di aumentare l'EMCF ψ senza alterare le proprietà meccaniche della struttura deformabile 50 e dunque le proprietà di
15 funzionamento del dispositivo MEMS 30 (es., frequenza di risonanza, banda di fondo scala, ecc.)

La figura 5 mostra invece, nel piano YZ, un dettaglio di una sezione trasversale della struttura deformabile 50, presa lungo una linea di sezione B-B mostrata in figura 6.

20 Opzionalmente e come mostrato in figura 5, il corpo principale 52 comprende inoltre uno o più elementi di supporto 70 che si estendono nella cavità sepolta 65 fra la porzione inferiore 52' e la porzione superiore 52'', in modo da unire fra loro lungo l'asse Z la porzione inferiore 52'
25 e la porzione superiore 52''. In questo modo, lo stress e la

deformazione della porzione inferiore 52' si trasmettono in modo più uniforme alla porzione superiore 52", evitando così sia che le porzioni 52' e 52" si deformino in modo sostanzialmente indipendente fra loro (correndo così il rischio di deflettersi come due travi separate e parallele e non come un'unica trave) che la possibilità di collasso della cavità sepolta 65 (cioè che la prima e la seconda superficie interna 65a, 65b del corpo principale 52 vadano in battuta fra loro) quando la struttura deformabile 50 subisce stress eccessivi.

A scopo esemplificativo e non limitante, gli elementi di supporto 70 possono essere dei pilastri (non mostrati, ad esempio di forma cilindrica con base circolare o poligonale, es. quadrata o esagonale) oppure delle strutture di supporto ad esempio aventi forma sostanzialmente a parallelepipedo retto (come mostrato in figura 6 ed esemplificativamente considerato nel seguito).

Il numero degli elementi di supporto 70 e la loro estensione parallelamente al piano XY vengono scelti in modo euristico in fase di progetto del dispositivo MEMS 30, tenendo conto di fattori quali il valore massimo di forza esterna lungo l'asse Z che il dispositivo MEMS 30 è progettato per sostenere o generare e la rigidità desiderata della struttura deformabile 50. A scopo puramente esemplificativo e non limitante, considerando un piano

parallelo al piano XY e passante per la cavità sepolta 65, il rapporto fra l'area totale di estensione degli elementi di supporto 70 relativamente all'area totale di estensione della cavità sepolta 65 in assenza di elementi di supporto
5 70 può essere minore di circa il 5%.

In particolare, la figura 6 mostra una vista dall'alto (cioè parallelamente al piano XY) con parti rimosse di una forma di realizzazione del dispositivo MEMS 30 in cui gli elementi di supporto 70 sono formati da queste strutture di
10 supporto esemplificativamente con forma a parallelepipedo retto. In dettaglio, la figura 6 non mostra la struttura piezoelettrica 54 e la porzione superiore 52" in modo da mostrare la cavità sepolta 65 e le strutture di supporto (nel seguito indicate anch'esse con il riferimento 70).

15 Nella forma di realizzazione di figura 6, le strutture di supporto 70 presentano rispettive direzioni di estensione principale (es., lato maggiore della base del parallelepipedo retto) che sono parallele all'asse X.

Le strutture di supporto 70 sono allineate fra loro a
20 gruppi (o file), ciascun gruppo avendo un rispettivo asse di allineamento 74 lungo il quale le strutture di supporto 70 del gruppo considerato hanno dette direzioni di estensione principale (cioè queste ultime giacciono sul rispettivo asse di allineamento 74). Di conseguenza, gli assi di allineamento
25 74 di gruppi diversi di strutture di supporto 70 sono

paralleli fra loro e rispetto all'asse X.

Due gruppi di strutture di supporto 70 adiacenti fra loro (cioè affacciati fra loro, senza alcun ulteriore gruppo interposto tra loro) delimitano lateralmente, lungo l'asse
5 Y, un rispettivo canale 78 che ha estensione principale parallela all'asse X. Ad esempio, gli assi di allineamento 74 sono equi spaziati fra loro lungo l'asse Y, così che i canali 78 abbiano uguale larghezza lungo l'asse Y.

In ciascun gruppo di strutture di supporto 70, queste
10 ultime sono disposte discretamente lungo il rispettivo asse di allineamento 74 in modo da avere una rispettiva apertura 76 che distanzia fra loro due strutture di supporto 70 adiacenti fra loro. Le aperture 76 mettono in comunicazione fra loro i canali 78 che formano, assieme alle aperture 76,
15 la cavità sepolta 65.

In dettaglio, le strutture di supporto 70 di ciascun gruppo sono sfalsate, parallelamente all'asse Y, rispetto alle strutture di supporto 70 del gruppo o della coppia di gruppi adiacenti, così che due gruppi adiacenti fra loro
20 abbiano le aperture 76 che sono sfalsate fra loro parallelamente all'asse Y, cioè non abbiano le aperture 76 che sono coassiali (reciprocamente allineate parallelamente all'asse Y). In altre parole, considerando i gruppi delle strutture di supporto 70 come identificati con una
25 numerazione progressiva lungo l'asse Y e in particolare

considerando un gruppo N e i gruppi N-1 e N+1 ad esso
adiacenti, le aperture 76 del gruppo N sono sfalsate
parallelamente all'asse Y rispetto alle aperture 76 dei
gruppi N-1 e N+1. Più in dettaglio, sono coassiali le
5 aperture 76 di gruppi che sono alternati fra loro lungo
l'asse Y (cioè le aperture 76 dei gruppi N-1 e N+1 sono
allineate fra loro parallelamente all'asse Y, così come lo
sono fra loro quelle dei gruppi N, N-2, N+2 che però sono
sfalsate rispetto a quelle dei gruppi N-1 e N+1). Questa
10 disposizione delle strutture di supporto 70 e delle aperture
76 massimizza l'accoppiamento meccanico della porzione
superiore 52'' del corpo principale 52 con la porzione
inferiore 52' del corpo principale 52 migliorando la
distribuzione dello stress lungo la struttura deformabile
15 50.

La forma di realizzazione del dispositivo MEMS 30
mostrata in figura 6 presenta a scopo esemplificativo anche
la massa sismica, qui indicata con il riferimento 72 e
accoppiata alla struttura deformabile 50 in corrispondenza
20 della seconda estremità 50'' (in dettaglio, monolitica con la
struttura deformabile 32). Questa forma di realizzazione
comprendente la massa sismica 72 è anche mostrata in figura
7, in vista in sezione longitudinale presa lungo la linea di
sezione A-A.

25 In generale, la struttura deformabile 50 è deformabile,

dunque può passare dalla condizione a riposo ad una condizione di deformazione. Quanto mostrato e descritto con riferimento alla figura 2 vale analogamente anche per la condizione di deformazione della struttura deformabile 50, 5 che dunque non è nuovamente mostrata e descritta in dettaglio.

Il dispositivo MEMS 30 includente la struttura deformabile 50 può quindi esser utilizzato sia come sensore o energy harvester che come attuatore (polarizzando lo strato piezoelettrico per causarne la deformazione e, 10 conseguentemente, la deflessione della struttura deformabile 10 lungo l'asse Z).

In particolare, nel caso di utilizzo come sensore o energy harvester e considerando esemplificativamente anche 15 la presenza della massa sismica 72, quando il dispositivo MEMS 30 è soggetto a forze esterne agenti parallelamente all'asse Z (es., dovute ad accelerazioni a cui è sottoposto il dispositivo MEMS 30 relativamente all'ambiente esterno), si genera una deformazione elastica (in dettaglio, 20 flessione) della struttura deformabile 50 a causa del movimento oscillatorio della massa sismica 72 relativamente alla struttura di ancoraggio 32. Questa deformazione elastica della struttura deformabile 50 genera una corrispondente deformazione elastica dello strato 25 piezoelettrico 62 e questo, per effetto piezoelettrico

diretto, causa una differenza di potenziale fra il primo ed il secondo elettrodo 60, 61, che viene acquisita (per esser misurata in caso di utilizzo come sensore, o per esser usata per pilotare un carico elettrico in caso di utilizzo come energy harvester).

Invece, nel caso di utilizzo come attuatore, viene applicata (es., tramite un apparecchio di polarizzazione di tipo noto, esterno al dispositivo MEMS 30 ed accoppiato elettricamente a quest'ultimo) una differenza di potenziale fra il primo ed il secondo elettrodo 60, 61 in modo da polarizzare lo strato piezoelettrico 62 così che quest'ultimo, per effetto piezoelettrico inverso, si deformi elasticamente (generando così un movimento relativo della seconda estremità 50'' rispetto alla prima estremità 50' e alla struttura di ancoraggio 32). Questa deformazione può esser utilizzata per fini di attuazione, in modo di per sé noto.

Le figure 8A-8I mostrano, in viste in sezione longitudinale lungo la linea di sezione A-A, rispettive fasi di un processo di fabbricazione del dispositivo MEMS 30.

In generale, il processo di fabbricazione comprende le fasi di: formare, su una prima superficie 100a di un substrato 100 di materiale semiconduttore, il corpo principale 52 della prima struttura deformabile 50, di materiale semiconduttore, in cui il corpo semiconduttore 31

comprende il substrato 100; formare nel corpo principale 52 la cavità sepolta 65, in cui lo spessore massimo D_1 della porzione superiore 52'' del corpo principale 52 lungo l'asse Z è minore di uno spessore minimo D_2 della porzione inferiore 52' del corpo principale 52 lungo l'asse Z; formare sulla prima superficie esterna 52a la struttura piezoelettrica 54, allineata lungo l'asse Z con la cavità sepolta 65; e formare nel substrato 100, a partire da una seconda superficie 100b del substrato 100 opposta alla prima superficie 100a del substrato 100 lungo l'asse Z, la cavità principale 57 in modo tale da definire la struttura di ancoraggio 32 e da avere la prima struttura deformabile 50 fissata alla struttura di ancoraggio 32 tramite la prima estremità 50' e sospesa sulla cavità principale 57.

15 A scopo esemplificativo, il processo di fabbricazione è descritto più in dettaglio nel seguito facendo riferimento alla forma di realizzazione del dispositivo MEMS 30 di figura 6 e al caso in cui il dispositivo MEMS 30 comprende la massa sismica 72. Ciononostante, risulta evidente che le fasi relative alla fabbricazione della massa sismica 72 possono anche esser assenti e che quanto descritto si applica in modo analogo anche alla fabbricazione delle altre forme di realizzazione del dispositivo MEMS 30.

25 Come mostrato in figura 8A, inizialmente si dispone il substrato 100 di materiale semiconduttore (es., silicio). Il

substrato 100 presenta la prima superficie 100a e la seconda superficie 100b opposte fra loro lungo l'asse Z. Ad esempio, il substrato 100 ha spessore lungo l'asse Z compreso fra circa 250 μm e circa 900 μm .

5 Sulla prima superficie 100a del substrato 100 vengono formati un primo strato di bloccaggio 104 ed un secondo strato di bloccaggio 102, di materiale isolante (es., ossido quale ossido di silicio). Il primo ed il secondo strato di bloccaggio 104 e 102 sono formati lateralmente fra loro lungo
10 l'asse X (cioè affiancati lungo l'asse X), ad esempio in modo da esser a distanza fra loro. In particolare, il primo ed il secondo strato di bloccaggio 104 e 102 sono formati tramite tecniche quali ossidazione termica, anodizzazione in umido ("wet anodization"), deposizione chimica da vapore
15 ("chemical vapour deposition", CVD) e anodizzazione al plasma.

In maggior dettaglio, viene formato uno strato di ossido sulla prima superficie 100a del substrato 100, ad esempio eseguendo un processo termico in atmosfera con ossigeno così
20 da far reagire l'ossigeno con il silicio per creare ossido di silicio in corrispondenza della prima superficie 100a del substrato 100. Sullo strato di ossido viene poi formata una prima maschera (non mostrata e tramite tecniche fotolitografiche di per sé note, es. di photoresist) che
25 espone una superficie superiore dello strato di ossido

lasciando coperte regioni di essa che sono affiancate fra loro e reciprocamente a distanza lungo l'asse X e che sono destinate a diventare il primo ed il secondo strato di bloccaggio 104 e 102. Successivamente si esegue un attacco 5 ("etching") delle porzioni dello strato di ossido esposte dalla prima maschera, ad esempio tramite attacco umido ("wet teching", es. a base di HF) oppure attacco al plasma ("plasma etching", es. tramite composti di cloro o fluoro quale CF_4), per rimuovere le porzioni dello strato di ossido esposte 10 dalla prima maschera. Si procede poi alla rimozione della prima maschera, lasciando così il primo ed il secondo strato di bloccaggio 104 e 102 sulla prima superficie 100a del substrato 100.

Alternativamente, viene formata una prima maschera che 15 copre la prima superficie 100a del substrato 100 lasciando esposte regioni della prima superficie 100a che sono affiancate fra loro e reciprocamente a distanza lungo l'asse X e che sono destinate a diventare il primo ed il secondo strato di bloccaggio 104 e 102. Viene poi eseguita la 20 formazione dello strato di ossido, ad esempio eseguendo un processo termico in atmosfera con ossigeno così da far reagire l'ossigeno con il silicio per creare ossido di silicio in corrispondenza delle regioni della prima superficie 100a esposte dalla prima maschera. Si procede poi 25 alla rimozione della prima maschera, lasciando così il primo

ed il secondo strato di bloccaggio 104 e 102 sulla prima superficie 100a del substrato 100.

Con riferimento alla figura 8B, si forma un primo strato epitassiale 106 (di materiale semiconduttore, es. silicio) sulla prima superficie 100a del substrato 100 e sul primo e sul secondo strato di bloccaggio 104 e 102. Il primo strato epitassiale 106 ha una prima e una seconda superficie 106a e 106b, opposte fra loro lungo l'asse Z, dove la seconda superficie 106b è affacciata al substrato 100. In particolare, questo avviene tramite tecniche note di crescita epitassiale, ad esempio tramite CVD, deposizione fisica da vapore ("physical vapour deposition", PVD) o epitassia da fasci molecolari ("molecular beam epitaxy", MBE). Il primo strato epitassiale 106 è atto a formare la porzione inferiore 52' del corpo principale 52, come meglio discusso in seguito. In dettaglio, il primo strato epitassiale 106 presenta, sopra al primo strato di bloccaggio 104, spessore lungo l'asse Z pari allo spessore minimo D_2 (es., spessore misurato lungo l'asse Z fra la prima superficie 106a del primo strato epitassiale 106 e il primo strato di bloccaggio 104).

Con riferimento alla figura 8C, si forma un primo strato sacrificale 108, di materiale isolante (in particolare ossido quale ossido di silicio), sul primo strato epitassiale 106 (cioè sulla sua prima superficie 106a), analogamente a

come descritto con riferimento alla figura 8A. In particolare, il primo strato sacrificale 108 è sovrapposto (cioè allineato verticalmente, lungo l'asse Z) al primo strato di bloccaggio 104. Questo viene realizzato ad esempio
5 tramite deposizione di ossido sulla prima superficie 106a del primo strato epitassiale 106, seguita da attacco dell'ossido eseguito attraverso una seconda maschera (analogo alla prima maschera) che copre una regione della superficie superiore di questo strato di ossido che è
10 sovrapposta al primo strato di bloccaggio 104, in modo da rimuovere le porzioni di ossido esposte dalla seconda maschera per definire così il primo strato di bloccaggio 104.

Con riferimento alla figura 8D, si forma un secondo
15 strato epitassiale 110 (di materiale semiconduttore, es. silicio) sulla prima superficie 106a del primo strato epitassiale 106 e sul primo strato sacrificale 108. Questo viene realizzato analogamente a quanto precedentemente descritto con riferimento alla figura 8B. Il secondo strato
20 epitassiale 110 ha una prima superficie 110a e una seconda superficie 110b opposte fra loro lungo l'asse Z, dove la seconda superficie 110b è affacciata al primo strato epitassiale 106. Ad esempio, il secondo strato epitassiale 110 ha spessore lungo l'asse Z compreso fra circa 2 μm e
25 circa 80 μm (in generale, spessore circa pari all'altezza

massima H). Il secondo strato epitassiale 110 è atto a formare le porzioni laterali 52''' del corpo principale 52 e ad ospitare la cavità sepolta 65, come meglio discusso in seguito.

5 La figura 8D mostra anche la formazione, nel secondo strato epitassiale 110, di una pluralità di prime trincee di lavoro 112. In dettaglio, le prime trincee di lavoro 112 sono sovrapposte al primo strato sacrificale 108 e si estendono attraverso il secondo strato epitassiale 110,
10 dalla prima superficie 110a fino a raggiungere la seconda superficie 110b del secondo strato epitassiale 110. Le prime trincee di lavoro 112 sono formate tramite un primo attacco ("etching") del secondo strato epitassiale 110, eseguito ad esempio tramite attacco umido ("wet teching", in dettaglio
15 di tipo anisotropo, es. tramite KOH) oppure attacco al plasma ("plasma etching", es. tramite processo Bosch e cioè tramite utilizzo di plasma a base di composti di cloro o fluoro). In maggior dettaglio, inizialmente si forma una terza maschera (analoga alla prima maschera) che copre la prima superficie
20 110a del secondo strato epitassiale 110 lasciando esposte regioni della prima superficie 110a attraverso le quali verrà eseguito il primo attacco e che sono dunque sovrapposte alle porzioni di silicio che verranno rimosse per formare le prime trincee di lavoro 112. Successivamente, si esegue il primo
25 attacco attraverso questa terza maschera in modo da rimuovere

selettivamente le porzioni di silicio esposte dalla terza maschera. Infine si rimuove la terza maschera dal secondo strato epitassiale 110, ottenendo la struttura mostrata in figura 8D.

5 Con riferimento alla figura 8E, si forma (analogamente a come descritto con riferimento alla figura 8A) un secondo strato sacrificale 114, di materiale isolante (in particolare ossido quale ossido di silicio), sul secondo strato epitassiale 110 (cioè sulla sua prima superficie 110a)
10 in modo tale da riempire le prime trincee di lavoro 112. Il secondo strato sacrificale 114 presente nelle prime trincee di lavoro 112 forma degli elementi sacrificali 116 di ossido, ad esempio dei pilastri (colonne), che si estendono dal primo strato sacrificale 108 alla prima superficie 110a del secondo
15 strato epitassiale 110. Le porzioni di silicio interposte, lungo l'asse X, fra due elementi sacrificali 116 adiacenti fra loro e sovrapposte al primo strato sacrificale 108 vengono nel seguito chiamate porzioni sacrificali del secondo strato epitassiale 110 e sono indicate con il
20 riferimento 118. In particolare, il secondo strato sacrificale 114 espone, almeno in parte, le regioni della prima superficie 110a del secondo strato epitassiale 110 che sono sovrapposte alle porzioni sacrificali 118. Nel seguito, queste regioni sono anche chiamate regioni di attacco e sono
25 indicate con il riferimento 120. In altre parole, il secondo

strato sacrificale 114 copre la prima superficie 110a del secondo strato epitassiale 110 ma presenta aperture di attacco 122 che espongono le regioni di attacco 120 e dunque le porzioni sacrificali 118. In maggior dettaglio, queste aperture di attacco 122 presentano larghezza, misurata lungo l'asse X, minore della distanza, misurata lungo l'asse X, fra due elementi sacrificali 116 adiacenti fra loro (es., la larghezza delle aperture di attacco 122 è compresa fra circa 0.3 μm e circa 2 μm). In questo modo, per ciascun elemento sacrificale 116, una rispettiva parte del secondo strato sacrificale 114 si estende anche su parte delle porzioni sacrificali 118 affacciate all'elemento sacrificale 116 considerato, formando assieme a quest'ultimo una rispettiva struttura sacrificale 124 avente sostanzialmente forma a T o a fungo.

Questo viene realizzato ad esempio tramite deposizione di ossido eseguita uniformemente sulla prima superficie 110a del secondo strato epitassiale 110 (cioè anche sulle regioni di attacco 120) e poi tramite un attacco usato per rimuovere selettivamente l'ossido presente sopra le regioni di attacco 120 (es., tramite la formazione di una maschera, analoga alla prima maschera, sul secondo strato sacrificale 114 che copre il secondo strato sacrificale 114 lasciando esposte le regioni di ossido sovrapposte alle regioni di attacco 120 e, successivamente, l'esecuzione dell'attacco attraverso questa

maschera).

Con riferimento alla figura 8F, si esegue la rimozione delle porzioni sacrificali 118 per formare rispettive seconde trincee di lavoro 126. In particolare, le seconde
5 trincee di lavoro 126 hanno forma complementare agli elementi sacrificali 116. In dettaglio, questo viene realizzato tramite un secondo attacco (analogo al primo attacco e, ad esempio, attacco umido a base di KOH o TMAAH oppure attacco al plasma a base di XeF_2 o SF_6) eseguito utilizzando il
10 secondo strato sacrificale 114 come maschera per rimuovere selettivamente le porzioni sacrificali 118 esposte tramite le aperture di attacco 122. Il secondo attacco è eseguito a partire dalle regioni di attacco 120 e fino a raggiungere il primo strato sacrificale 108, che blocca il secondo attacco
15 impedendo che proceda anche nel silicio sottostante. In questo modo, il primo strato sacrificale 108 viene esposto dal secondo attacco.

Con riferimento alla figura 8G, si forma un terzo strato sacrificale 128, di materiale isolante (in particolare
20 ossido quale ossido di silicio), sulle strutture sacrificali 124 (più in generale, sugli elementi sacrificali 116) in modo da sigillare le seconde trincee di lavoro 126 coprendo le aperture di attacco 122. In particolare, questo viene fatto depositando uno strato di ossido sul secondo strato
25 sacrificale 114, dunque sia sulle strutture sacrificali 124

che sulle aperture di attacco 122 (es., tramite CVD di materiali quali TEOS o "undoped silicon glass", USG). Dopodiché, si rimuovono le porzioni di questo strato di ossido e del secondo strato sacrificale 114 che si estendono
5 sulla prima superficie 110a del secondo strato epitassiale 110, lasciando intatte invece le strutture sacrificali 124 e la porzione dello strato di ossido che è sovrapposta alle strutture sacrificali 124 e alle aperture di attacco 122 e che è destinata a formare il terzo strato sacrificale 128.
10 Questo viene fatto ad esempio formando una quarta maschera (analoga alla prima maschera) su questo strato di ossido, che copre le porzioni dello strato di ossido sovrapposte alle strutture sacrificali 124 e alle aperture di attacco 122 e che espone le restanti porzioni dello strato di ossido,
15 ed eseguendo successivamente un attacco attraverso la quarta maschera per rimuovere le porzioni dello strato di ossido e del secondo strato sacrificale 114 esposte dalla quarta maschera.

Inoltre, in figura 8G si forma un terzo strato epitassiale 130 (di materiale semiconduttore, es. silicio)
20 sulla prima superficie 110a esposta del secondo strato epitassiale 110 e sul terzo strato sacrificale 128. Questo viene realizzato analogamente a quanto precedentemente descritto con riferimento alla figura 8B. Il terzo strato
25 epitassiale 130 ha una prima superficie 130a e una seconda

superficie 130b opposte fra loro lungo l'asse Z, dove la
seconda superficie 130b è affacciata al secondo strato
epitassiale 110. Il terzo strato epitassiale 130 è atto a
formare la porzione superiore 52" del corpo principale 52,
5 come meglio discusso in seguito. Il terzo strato epitassiale
130 forma, assieme al substrato 100, al primo strato
epitassiale 106 e al secondo strato epitassiale 110, il corpo
semiconduttore 31. In dettaglio, il terzo strato epitassiale
130 presenta, sopra al terzo strato sacrificale 128, spessore
10 lungo l'asse Z pari allo spessore massimo D_1 minore dello
spessore minimo D_2 (es., spessore misurato lungo l'asse Z
fra la prima superficie 130a del terzo strato epitassiale
130 e il terzo strato sacrificale 128).

Con riferimento alla figura 8H, si forma la struttura
15 piezoelettrica 54 sul terzo strato epitassiale 130, in modo
che la struttura piezoelettrica 54 sia sovrapposta alle
seconde trincee di lavoro 126 e alle strutture sacrificali
124. In dettaglio, questo comprende formare, in successione
fra loro, il primo elettrodo 60 (es., di metallo quale oro
20 o platino), lo strato piezoelettrico 62 (di materiale
piezoelettrico quale PZT) e il secondo elettrodo 61 (es., di
metallo quale oro o platino), tramite tecniche di per sé
note. Ad esempio, questo avviene tramite una quinta maschera
(analoga alla prima maschera) che copre la prima superficie
25 130a del terzo strato epitassiale 130 lasciando esposta una

regione di questa prima superficie 130a che è sovrapposta alle seconde trincee di lavoro 126 e alle strutture sacrificali 124.

Inoltre, in figura 8H si formano una prima trincea di disaccoppiamento 132 e uno o più fori di attacco 134 (nel seguito si considera, in modo esemplificativo e non limitante, il caso di un foro di attacco 134). La prima trincea di disaccoppiamento 132 è sovrapposta al secondo strato di bloccaggio 102 e si estende a partire dalla prima superficie 130a del terzo strato epitassiale 130 fino a raggiungere il secondo strato di bloccaggio 102. Il foro di attacco 134 è sovrapposto al terzo strato sacrificale 128 e dunque alle seconde trincee di lavoro 126 e alle strutture sacrificali 124 e si estende a partire dalla prima superficie 130a del terzo strato epitassiale 130 fino a raggiungere il terzo strato sacrificale 128, lateralmente alla prima trincea di disaccoppiamento 132 lungo l'asse X. Ad esempio, il foro di attacco 134 è sovrapposto ad una delle seconde trincee di lavoro 126. La formazione della prima trincea di disaccoppiamento 132 e del foro di attacco 134 avviene tramite un terzo attacco (analogo al primo attacco) eseguito attraverso una sesta maschera (analogo alla prima maschera) che copre la prima superficie 130a del terzo strato epitassiale 130 e la struttura piezoelettrica 54 e lascia esposte regioni della prima superficie 130a del terzo strato

epitassiale 130 che sono rispettivamente sovrapposte al secondo strato di bloccaggio 102 e al terzo strato sacrificale 128.

Con riferimento alla figura 8I, opzionalmente ed in modo non mostrato, vengono realizzati in modo di per sé noto contatti metallici e piazzole ("pads"), di metallo quale oro, accoppiati al primo ed al secondo elettrodo 60, 61 per permettere l'accoppiamento elettrico della struttura piezoelettrica 54 con l'ambiente esterno (es., con un apparecchio di polarizzazione o di misura, esterno al dispositivo MEMS 30).

Inoltre, sempre con riferimento alla figura 8I, si eseguono ulteriori attacchi a partire dalla seconda superficie 100b del substrato 100 al fine di definire la struttura deformabile 50 (in dettaglio, per disaccoppiarla dalla struttura di ancoraggio 32 comprendente parte del substrato 100) e, opzionalmente, di definire la massa sismica 72. In particolare, si esegue un attacco di cavità principale a partire dalla seconda superficie 100b del substrato 100 per rimuovere porzioni del substrato 100 che sono allineate lungo l'asse Z con il primo strato di bloccaggio 104 e il secondo strato di bloccaggio 102 in modo tale da formare rispettivamente una cavità di lavoro 138 e una seconda trincea di disaccoppiamento 140 che espongono il primo strato di bloccaggio 104 e, rispettivamente, il secondo strato di

bloccaggio 102 e che fanno parte della cavità principale 57.
L'attacco di cavità principale comprende un quinto attacco
meglio descritto nel seguito e, opzionalmente, anche un
assottigliamento dello spessore del substrato 100 in
5 corrispondenza della massa sismica 72, come meglio descritto
nel seguito con riferimento ad un quarto attacco.

In maggior dettaglio, opzionalmente viene inizialmente
eseguito il quarto attacco (es., attacco secco, "dry
etching", ad esempio attacco Bosch) per formare una prima
10 cavità di lavoro 136 (opzionale) che si estende nel substrato
100 ed è affacciata alla seconda superficie 100b del
substrato 100. In particolare, la prima cavità di lavoro 136
si estende dalla seconda superficie 100b del substrato 100
verso la prima superficie 100a del substrato 100, senza
15 raggiungere quest'ultima, ed è allineata lungo l'asse Z con
le seconde trincee di lavoro 126, le strutture sacrificali
124 e con le porzioni del primo, del secondo e del terzo
strato epitassiale 106, 110 e 130 che si estendono lungo
l'asse X fra le seconde trincee di lavoro 126, le strutture
20 sacrificali 124 e la prima trincea di disaccoppiamento 132.
Ad esempio, il quarto attacco viene eseguito attraverso una
settima maschera (analoga alla prima maschera) che copre la
seconda superficie 100b del substrato 100 lasciando esposta
una regione della seconda superficie 100b a cui sono
25 sovrapposte le seconde trincee di lavoro 126, le strutture

sacrificali 124, la prima trincea di disaccoppiamento 132 e le porzioni del primo, del secondo e del terzo strato epitassiale 106, 110 e 130 che si estendono lungo l'asse X fra le seconde trincee di lavoro 126 e la prima trincea di disaccoppiamento 132. Il quinto attacco permette quindi di ridurre lo spessore lungo l'asse Z della porzione del substrato 100 a cui sono sovrapposte le porzioni del primo, del secondo e del terzo strato epitassiale 106, 110 e 130 che si estendono lungo l'asse X fra le seconde trincee di lavoro 126 e la prima trincea di disaccoppiamento 132. La superficie del substrato 100 che delimita lungo l'asse Z la prima cavità di lavoro 136 viene chiamata nel seguito terza superficie 100c del substrato 100.

Inoltre, viene eseguito il quinto attacco (analogo al quarto attacco) per formare una seconda cavità di lavoro 138 e una seconda trincea di disaccoppiamento 140 in corrispondenza della prima cavità di lavoro 136 (cioè a partire dalla terza superficie 100c del substrato 100). La seconda cavità di lavoro 138 è allineata lungo l'asse Z con il primo strato di bloccaggio 104 (dunque con le seconde trincee di lavoro 126 e le strutture sacrificali 124) e si estende a partire dalla terza superficie 100c del substrato 100 (alternativamente, dalla seconda superficie 100b quando non viene eseguito il quarto attacco) fino a raggiungere il primo strato di bloccaggio 104. La seconda trincea di

disaccoppiamento 140 è allineata lungo l'asse Z con il secondo strato di bloccaggio 102 (dunque con la prima trincea di disaccoppiamento 132) e si estende a partire dalla terza superficie 100c del substrato 100 (alternativamente, dalla
5 seconda superficie 100b quando non viene eseguito il quarto attacco) fino a raggiungere il secondo strato di bloccaggio 102.

In questo modo, la prima cavità di lavoro 136 e la seconda cavità di lavoro 138 formano parte della cavità
10 principale 57 su cui sono sospese la struttura deformabile 50 e la massa sismica 72. Le porzioni del primo, del secondo e del terzo strato epitassiale 106, 110 e 130 che si estendono lungo l'asse X fra le seconde trincee di lavoro 126 e la prima trincea di disaccoppiamento 132 formano,
15 assieme alla sottostante porzione del substrato 100 ad esse allineata lungo l'asse Z, la massa sismica 72. Le porzioni del primo e del terzo strato epitassiale 106 e 130 che sono sovrapposte alla seconda cavità di lavoro 138 formano, assieme alla struttura piezoelettrica 54, la struttura
20 deformabile 50. Le restanti porzioni del substrato 100 e del primo, del secondo e del terzo strato epitassiale 106, 110 e 130 formano la struttura di ancoraggio 32 alla quale è vincolata la struttura deformabile 50. Infatti, come mostrato in figura 6, la prima e la seconda trincea di
25 disaccoppiamento 132, 140 circondano, parallelamente al

piano XY, la struttura deformabile 50 e la massa sismica 72 in modo da disaccoppiare del tutto la massa sismica 72 dalla struttura di ancoraggio 32 e da disaccoppiare parzialmente la struttura deformabile 50 dalla struttura di ancoraggio 5 32, lasciando collegate fra loro la massa sismica 72 e la struttura deformabile 50 solo in corrispondenza della prima estremità 50' della struttura deformabile 50.

In maggior dettaglio, il quinto attacco è eseguito tramite l'utilizzo di una ottava maschera (analoga alla prima 10 maschera) che copre la seconda e la terza superficie 100b, 100c del substrato 100 e che espone regioni della terza superficie 100b del substrato 100 che sono allineate lungo l'asse Z alla prima trincea di disaccoppiamento 132, alle seconde trincee di lavoro 126 e alle strutture sacrificali 15 124.

Inoltre, con riferimento alla figura 8I viene formata la cavità sepolta 65. In particolare, questo avviene eseguendo un sesto attacco (o attacco di cavità sepolta) atto a rimuovere il terzo strato sacrificale 128, le 20 strutture sacrificali 124 e il primo strato sacrificale 108. Il sesto attacco è ad esempio un attacco umido (es., a base di HF) ed è eseguito attraverso il foro di attacco 134, che permette all'agente chimico di raggiungere il terzo strato sacrificale 128, le strutture sacrificali 124 e il primo 25 strato sacrificale 108 per rimuoverli. In dettaglio, il sesto

attacco rimuove selettivamente l'ossido e non il silicio. In altre parole, il terzo strato epitassiale 130 opera come maschera per il sesto attacco.

Il sesto attacco rimuove analogamente anche il secondo
5 strato di bloccaggio 102 esposto tramite la prima trincea di disaccoppiamento 132, nonché il primo strato di bloccaggio 104 esposto dalla cavità principale 57 (in dettaglio, dalla seconda cavità di lavoro 138). Di conseguenza, la prima e la seconda trincea di disaccoppiamento 132, 140 si estendono in
10 continuità fra loro e dunque la struttura deformabile 50 e la massa sismica 2 sono disaccoppiate dalla struttura di ancoraggio 32, ad eccezione della prima estremità 50' della struttura deformabile 50.

Al termine di queste fasi di fabbricazione si ottiene
15 il dispositivo MEMS 30 mostrato ad esempio nelle figure 6 e 7.

In particolare, le fasi di fabbricazione precedentemente discusse sono state descritte con riferimento ad una sezione del dispositivo MEMS 30 presa
20 lungo la linea di sezione A-A in cui non sono mostrati elementi di supporto 70; ciononostante, si applicano in modo analogo anche alla formazione degli elementi di supporto 70, se presenti (ad esempio, con riferimento alla fabbricazione del dispositivo MEMS 30 lungo la linea di sezione C-C
25 mostrata in figura 6 e passante per gli elementi di supporto

70, in figura 8D si formano una pluralità di gruppi di prime trincee di lavoro 112 invece che un solo gruppo di prime trincee di lavoro 112, questi gruppi essendo affiancati e distanziati fra loro lungo l'asse X, in cui ciascun gruppo porta alla formazione di una rispettiva apertura 76 e in cui ciascuna porzione del secondo strato epitassiale 110 compresa fra due gruppi adiacenti fra loro di prime trincee di lavoro 112 forma un rispettivo elemento di supporto 70).

Diversamente, nel caso in cui il dispositivo MEMS 30 non comprende la massa sismica 72, l'attacco di cavità principale è eseguito a partire dalla seconda superficie 100b del substrato 100 per rimuovere una porzione del substrato 100 che è allineata lungo l'asse Z con il primo strato di bloccaggio 104 e il secondo strato di bloccaggio 102 in modo tale da esporre il primo strato di bloccaggio 104, il secondo strato di bloccaggio 102 e una porzione del primo strato epitassiale 106 che si estende, lungo l'asse X, fra il primo strato di bloccaggio 104 e il secondo strato di bloccaggio 102. In altre parole, il quarto attacco può essere eseguito in modo tale per cui la prima cavità di lavoro 136 arrivi fino al primo strato epitassiale 106 e quindi al primo ed al secondo strato di bloccaggio 104 e 102 e non viene eseguito il quinto attacco. Inoltre, in questo caso la prima trincea di disaccoppiamento 132 può estendersi ad una distanza ridotta lungo l'asse X dalla cavità sepolta 65 (es.,

minore di circa 10 μm).

Da un esame delle caratteristiche del trovato realizzato secondo la presente invenzione sono evidenti i vantaggi che esso consente di ottenere.

5 In particolare, la struttura deformabile 50
comprendente la cavità sepolta 65 aumenta, a parità di massa
di materiale solido utilizzato, la $h_{\text{piezo-neutrax}}$ rispetto alle
soluzioni note. Questo permette di aumentare l'EMCF ψ senza
dover aumentare la massa del materiale solido presente nella
10 struttura deformabile 50 e dunque senza dover aumentare la
rigidezza della struttura deformabile 50. Di conseguenza, è
possibile aumentare l'EMCF ψ senza modificare le proprietà
meccaniche ed elettriche del dispositivo MEMS 30, e questo
avviene senza dover agire sulla struttura piezoelettrica 54
15 (es., cambiando il materiale piezoelettrico) e senza
richiedere un ingombro aggiuntivo o una forma specifica della
struttura deformabile 50 parallelamente al piano XY. Questo
avviene grazie alla cavità sepolta 65 che fa sì che il piano
neutro 56 e il piano di mezzeria 58 non coincidano.

20 Inoltre, tutte le soluzioni note precedentemente
descritte al fine di aumentare l'EMCF ψ possono comunque
esser utilizzate in aggiunta alla presente struttura
deformabile 50 (es., la struttura deformabile 50 con forma
rastremata o diversi materiali per lo strato piezoelettrico
25 62). Di conseguenza, questa soluzione non è in contrasto con

le soluzioni note ma può esser combinata con esse per aumentare ulteriormente l'EMCF ψ .

Ad esempio, è stato verificato che la presente struttura deformabile 50 permette di aumentare significativamente le prestazioni del dispositivo MEMS 30 rispetto alle soluzioni note, in particolare con aumenti anche del 40% circa dell'EMCF ψ che portano ad esempio ad aumenti analoghi della deformazione massima ottenibile quando il dispositivo MEMS 30 opera come attuatore, ad aumenti analoghi della massima differenza di potenziale elettrico fra gli elettrodi 60 e 61 quando il dispositivo MEMS 30 opera come sensore e ad aumenti anche del 106% circa della potenza erogata dal dispositivo MEMS 30 quando viene utilizzato come energy harvester.

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

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

Inoltre, la disposizione delle strutture di supporto 70 precedentemente descritta con riferimento alla figura 6 si applica in modo analogo anche al caso in cui gli elementi di supporto 70 presentano forma diversa e ad esempio sono dei pilastri.

RIVENDICAZIONI

1. Dispositivo MEMS (30) comprendente:

- un corpo semiconduttore (31) definente una cavità principale (57) e formante una struttura di ancoraggio (32);

5 e

- una prima struttura deformabile (50) avente una direzione di estensione principale (55) lungo un primo asse (X) e una prima (50') e una seconda (50'') estremità opposte fra loro lungo il primo asse (X), la prima struttura
10 deformabile (50) essendo fissata alla struttura di ancoraggio (32) tramite la prima estremità (50') in modo da esser sospesa sulla cavità principale (57),

in cui la seconda estremità (50'') è configurata per oscillare, rispetto alla struttura di ancoraggio (32), lungo
15 una direzione di oscillazione parallela ad un secondo asse (Z) ortogonale al primo asse (X),

in cui la prima struttura deformabile (50) comprende un corpo principale (52), avente una prima (52a) e una seconda (52b) superficie esterna opposte fra loro lungo il secondo
20 asse (Z), e una struttura piezoelettrica (54) estendentesi sulla prima superficie esterna (52a) del corpo principale (52),

in cui il corpo principale (52) comprende una porzione inferiore (52') e una porzione superiore (52'') che sono
25 accoppiate fra loro e che delimitano lungo il secondo asse

(Z) una prima cavità sepolta (65) del corpo principale (52),
che è allineata con la struttura piezoelettrica (54) lungo
il secondo asse (Z), la porzione superiore (52'') del corpo
principale (52) definendo la prima superficie esterna (52a)
5 del corpo principale (52) e la porzione inferiore (52') del
corpo principale (52) definendo la seconda superficie esterna
(52b) del corpo principale (52), e

in cui uno spessore massimo (D_1) della porzione
superiore (52'') del corpo principale (52) lungo il secondo
10 asse (Z) è minore di uno spessore minimo (D_2) della porzione
inferiore (52') del corpo principale (52) lungo il secondo
asse (Z).

2. Dispositivo MEMS (30) secondo la rivendicazione 1,
in cui la porzione superiore (52'') presenta una prima
15 superficie interna (65a) opposta lungo il secondo asse (Z)
alla prima superficie esterna (52a) rispetto alla porzione
superiore (52'') e la porzione inferiore (52') presenta una
seconda superficie interna (65b) opposta lungo il secondo
asse (Z) alla seconda superficie esterna (52b) rispetto alla
20 porzione inferiore (52'), la prima (65a) e la seconda (65b)
superficie interna essendo affacciate alla prima cavità
sepolta (65),

in cui lo spessore massimo (D_1) della porzione superiore
(52'') è una distanza massima fra la prima superficie interna
25 (65a) e la prima superficie esterna (52a) e lo spessore minimo

(D₂) della porzione inferiore (52') è una distanza minima fra la seconda superficie interna (65b) e la seconda superficie esterna (52b).

3. Dispositivo MEMS (30) secondo la rivendicazione 1 o
5 2, in cui il corpo principale (52) comprende inoltre uno o
più elementi di supporto (70) che si estendono nella prima
cavità sepolta (65) fra la porzione inferiore (52') e la
porzione superiore (52'') in modo da unire fra loro lungo il
secondo asse (Z) la porzione inferiore (52') e la porzione
10 superiore (52'').

4. Dispositivo MEMS (30) secondo la rivendicazione 3,
in cui il corpo principale (52) comprende una pluralità di
detti elementi di supporto (70), gli elementi di supporto
(70) essendo pilastri o strutture di supporto.

15 5. Dispositivo MEMS (30) secondo la rivendicazione 4,
in cui gli elementi di supporto (70) sono allineati fra loro
a gruppi, ciascun gruppo avendo i rispettivi elementi di
supporto (70) che sono allineati fra loro lungo un rispettivo
asse di allineamento (74) parallelo ad un terzo asse (Y)
20 ortogonale al primo (X) ed al secondo asse (Z),

in cui ciascuna coppia di gruppi di elementi di supporto
(70) che sono adiacenti fra loro delimitano lungo il terzo
asse (Y) un rispettivo canale (78) che ha estensione
principale parallela al primo asse (X), e

25 in cui, in ciascun gruppo, gli elementi di supporto

(70) sono disposti discretamente lungo il rispettivo asse di allineamento (74) in modo da formare, per ciascuna coppia di elementi di supporto (70) adiacenti fra loro in detto gruppo, una rispettiva apertura (76) che distanzia fra loro gli
5 elementi di supporto (70) di detta coppia di elementi di supporto (70),

in cui le aperture (76) mettono in comunicazione fra loro i canali (78) e formano, assieme ai canali (78), la prima cavità sepolta (65).

10 6. Dispositivo MEMS (30) secondo la rivendicazione 5, in cui gli elementi di supporto (70) di ciascun gruppo sono sfalsati, parallelamente al terzo asse (Y), rispetto agli elementi di supporto (70) del gruppo o della coppia di gruppi adiacenti così che le aperture (76) di ciascun gruppo siano
15 sfalsate, parallelamente al terzo asse (Y), rispetto alle aperture (76) del gruppo o della coppia di gruppi adiacenti.

7. Dispositivo MEMS (30) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre una massa sismica (72) fissata alla seconda estremità (50") della
20 struttura deformabile (50) in modo da esser sospesa sulla cavità principale (57), la massa sismica (72) essendo configurata per oscillare, rispetto alla struttura di ancoraggio (32), lungo la direzione di oscillazione.

8. Dispositivo MEMS (30) secondo una qualsiasi delle
25 rivendicazioni precedenti, in cui la porzione inferiore

(52') e la porzione superiore (52'') delimitano inoltre lungo il secondo asse (Z) almeno una seconda cavità sepolta (65) del corpo principale (52), che è allineata con la struttura piezoelettrica (54) lungo il secondo asse (Z) ed è affiancata
5 alla prima cavità sepolta (65) ortogonalmente al secondo asse (Z).

9. Dispositivo MEMS (30) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre almeno una seconda struttura deformabile (50) avente una rispettiva
10 direzione di estensione principale (55) e una rispettiva prima (50') e una rispettiva seconda (50'') estremità opposte fra loro lungo la direzione di estensione principale (55) della seconda struttura deformabile (50), la seconda struttura deformabile (50) essendo fissata alla struttura di
15 ancoraggio (32) tramite la rispettiva prima estremità (50') in modo da esser sospesa sulla cavità principale (57),

in cui la seconda estremità (50'') della seconda struttura deformabile (50) è configurata per oscillare, rispetto alla struttura di ancoraggio (32), parallelamente
20 alla direzione di oscillazione,

in cui la seconda struttura deformabile (50) comprende un rispettivo corpo principale (52), avente una rispettiva prima (52a) e una rispettiva seconda (52b) superficie esterna opposte fra loro lungo il secondo asse (Z), e una rispettiva
25 struttura piezoelettrica (54) estendentesi sulla prima

superficie esterna (52a) del corpo principale (52) della seconda struttura deformabile (50),

in cui il corpo principale (52) della seconda struttura deformabile (50) comprende una rispettiva porzione inferiore (52') e una rispettiva porzione superiore (52'') che sono accoppiate fra loro e che delimitano lungo il secondo asse (Z) una rispettiva prima cavità sepolta (65) del corpo principale (52) della seconda struttura deformabile (50), che è allineata con la struttura piezoelettrica (54) della seconda struttura deformabile (50) lungo il secondo asse (Z), la porzione superiore (52'') del corpo principale (52) della seconda struttura deformabile (50) definendo la prima superficie esterna (52a) del corpo principale (52) della seconda struttura deformabile (50) e la porzione inferiore (52') del corpo principale (52) della seconda struttura deformabile (50) definendo la seconda superficie esterna (52b) del corpo principale (52) della seconda struttura deformabile (50), e

in cui un rispettivo spessore massimo (D_1) della porzione superiore (52'') del corpo principale (52) della seconda struttura deformabile (50) lungo il secondo asse (Z) è minore di un rispettivo spessore minimo (D_2) della porzione inferiore (52') del corpo principale (52) della seconda struttura deformabile (50) lungo il secondo asse (Z).

10. Processo di fabbricazione di un dispositivo MEMS

(30) comprendente:

- un corpo semiconduttore (31) definente una cavità principale (57) e formante una struttura di ancoraggio (32);
e

5 - una prima struttura deformabile (50) avente una direzione di estensione principale (55) lungo un primo asse (X) e una prima (50') e una seconda (50'') estremità opposte fra loro lungo il primo asse (X), la prima struttura deformabile (50) essendo fissata alla struttura di
10 ancoraggio (32) tramite la prima estremità (50') in modo da esser sospesa sulla cavità principale (57) e la seconda estremità (50'') essendo configurata per oscillare, rispetto alla struttura di ancoraggio (32), lungo una direzione di oscillazione parallela ad un secondo asse (Z) ortogonale al
15 primo asse (X),

il processo di fabbricazione comprendendo le fasi di:

- formare, su una prima superficie (100a) di un substrato (100) di materiale semiconduttore, un corpo principale (52) della prima struttura deformabile (50),
20 comprendente materiale semiconduttore e avente una prima (52a) e una seconda (52b) superficie esterna opposte fra loro lungo il secondo asse (Z), il corpo semiconduttore (31) comprendendo il substrato (100);

- formare, nel corpo principale (52), una prima cavità sepolta (65) delimitata lungo il secondo asse (Z) da una
25

porzione inferiore (52') e da una porzione superiore (52'')
del corpo principale (52), accoppiate fra loro, in cui la
porzione superiore (52'') del corpo principale (52) definisce
la prima superficie esterna (52a) del corpo principale (52)
5 e la porzione inferiore (52') del corpo principale (52)
definisce la seconda superficie esterna (52b) del corpo
principale (52) e in cui in cui uno spessore massimo (D_1)
della porzione superiore (52'') del corpo principale (52)
lungo il secondo asse (Z) è minore di uno spessore minimo
10 (D_2) della porzione inferiore (52') del corpo principale (52)
lungo il secondo asse (Z);

- formare, sulla prima superficie esterna (52a), una
struttura piezoelettrica (54) della prima struttura
deformabile (50), la struttura piezoelettrica (54) essendo
15 allineata lungo il secondo asse (Z) alla prima cavità sepolta
(65); e

- formare nel substrato (100), a partire da una seconda
superficie (100b) del substrato (100) opposta alla prima
superficie (100a) del substrato (100) lungo il secondo asse
20 (Z), la cavità principale (57) in modo tale da definire la
struttura di ancoraggio (32) e da avere la prima struttura
deformabile (50) fissata alla struttura di ancoraggio (32)
tramite la prima estremità (50') e sospesa sulla cavità
principale (57).

25 11. Processo di fabbricazione secondo la rivendicazione

10, in cui la fase di formare il corpo principale (52) comprende:

- formare, sulla prima superficie (100a) del substrato (100), un primo strato di bloccaggio (104) di materiale
5 isolante;

- formare, sulla prima superficie (100a) del substrato (100) e sul primo strato di bloccaggio (104), un primo strato epitassiale (106) di materiale semiconduttore, il primo strato epitassiale (106) formando la porzione inferiore
10 (52') del corpo principale (52);

- formare, sul primo strato epitassiale (106), un primo strato sacrificale (108) di materiale isolante, sovrapposto al primo strato di bloccaggio (104) lungo il secondo asse (Z);

15 - formare, sul primo strato epitassiale (106) e sul primo strato sacrificale (108), un secondo strato epitassiale (110) di materiale semiconduttore, il secondo strato epitassiale (110) avendo una rispettiva prima superficie (110a) e una rispettiva seconda superficie (110b)
20 opposte fra loro lungo il secondo asse (Z), la seconda superficie (110b) del secondo strato epitassiale (110) essendo affacciata al primo strato epitassiale (106) e al primo strato sacrificale (108); e

- formare, sul secondo strato epitassiale (110), un
25 terzo strato epitassiale (130) di materiale semiconduttore,

il terzo strato epitassiale (130) formando la porzione superiore (52") del corpo principale (52).

12. Processo di fabbricazione secondo la rivendicazione 11, in cui la fase di formare la prima cavità sepolta (65) 5 comprende, dopo aver formato il secondo strato epitassiale (110) e prima di formare il terzo strato epitassiale (130):

- formare, nel secondo strato epitassiale (110) e tramite un primo attacco, una pluralità di prime trincee di lavoro (112) che sono sovrapposte lungo il secondo asse (Z) 10 al primo strato sacrificale (108) e si estendono attraverso il secondo strato epitassiale (110) dalla prima superficie (110a) del secondo strato epitassiale (110) fino alla seconda superficie (110b) del secondo strato epitassiale (110);

- formare, sul secondo strato epitassiale (110) e in 15 modo tale da riempire le prime trincee di lavoro (112), un secondo strato sacrificale (114) di materiale isolante, in cui porzioni del secondo strato sacrificale (114) presenti nelle prime trincee di lavoro (112) formano rispettivi elementi sacrificali (116) che si estendono attraverso il 20 secondo strato epitassiale (110) dalla prima superficie (110a) del secondo strato epitassiale (110) fino alla seconda superficie (110b) del secondo strato epitassiale (110), in cui porzioni del secondo strato epitassiale (110) interposte lungo il primo asse (X) fra elementi sacrificali (116) 25 adiacenti fra loro formano rispettive porzioni sacrificali

(118) del secondo strato epitassiale (110), il secondo strato sacrificale (114) presentando per ciascuna porzione sacrificale (118) una rispettiva apertura di attacco (122) che espone la rispettiva porzione sacrificale (118);

5 - rimuovere, tramite un secondo attacco eseguito attraverso le aperture di attacco (122), le porzioni sacrificali (118) per formare rispettive seconde trincee di lavoro (126) che si estendono dalle aperture di attacco (122) fino al primo strato sacrificale (108); e

10 - formare, sugli elementi sacrificali (116) e sulle seconde trincee di lavoro (126), un terzo strato sacrificale (128), di materiale isolante, che copre le aperture di attacco (122),

 in cui la fase di formare il terzo strato epitassiale
15 (130) sul secondo strato epitassiale (110) comprende formare il terzo strato epitassiale (130) anche sul terzo strato sacrificale (128), e

 in cui la fase di formare la prima cavità sepolta (65) comprende inoltre, dopo aver formato il terzo strato
20 epitassiale (130):

 - formare, nel terzo strato epitassiale (130) e tramite un terzo attacco, uno o più fori di attacco (134) che sono sovrapposti lungo il secondo asse (Z) al terzo strato sacrificale (128) e che si estendono attraverso il terzo
25 strato epitassiale (130) fino al terzo strato sacrificale

(128); e

- rimuovere, tramite un attacco di cavità sepolta eseguito attraverso l'uno o più fori di attacco (134), il terzo strato sacrificale (128), il secondo strato sacrificale (114) e il primo strato sacrificale (108) per formare la prima cavità sepolta (65).

13. Processo di fabbricazione secondo la rivendicazione 12, in cui la fase di formare il primo strato di bloccaggio (104) comprende inoltre formare, sulla prima superficie (100a) del substrato (100) e affiancato al primo strato di bloccaggio (104) lungo il primo asse (X), un secondo strato di bloccaggio (102) di materiale isolante;

in cui la fase di formare il primo strato epitassiale (106) comprende formare il primo strato epitassiale (106) anche sul secondo strato di bloccaggio (102),

in cui la fase di formare, tramite il terzo attacco, l'uno o più fori di attacco (134) comprende inoltre formare una prima trincea di disaccoppiamento (132) che è sovrapposta lungo il secondo asse (Z) al secondo strato di bloccaggio (102) e che si estende attraverso il terzo strato epitassiale (130) fino al secondo strato di bloccaggio (102), a fianco lungo il primo asse (X) dell'uno o più fori di attacco (134), del secondo strato sacrificale (114) e del terzo strato sacrificale (128), e

in cui la fase di rimuovere, tramite l'attacco di cavità

sepolta, il terzo strato sacrificale (128), il secondo strato sacrificale (114) e il primo strato sacrificale (108) comprende inoltre rimuovere il secondo strato di bloccaggio (102) eseguendo l'attacco di cavità sepolta anche attraverso
5 la prima trincea di disaccoppiamento (132).

14. Processo di fabbricazione secondo la rivendicazione 13, in cui la fase di formare la cavità principale (57) comprende, prima di rimuovere il terzo strato sacrificale (128), il secondo strato sacrificale (114), il primo strato
10 sacrificale (108) e il secondo strato di bloccaggio (102) tramite l'attacco di cavità sepolta, rimuovere, tramite un attacco di cavità principale eseguito a partire dalla seconda superficie (100b) del substrato (100), una porzione del substrato (100) che è allineata lungo il secondo asse (Z)
15 con il primo strato di bloccaggio (104) e il secondo strato di bloccaggio (102) in modo tale da esporre il primo strato di bloccaggio (104), il secondo strato di bloccaggio (102) e una porzione del primo strato epitassiale (106) che si estende, lungo il primo asse (X), fra il primo strato di
20 bloccaggio (104) e il secondo strato di bloccaggio (102), e

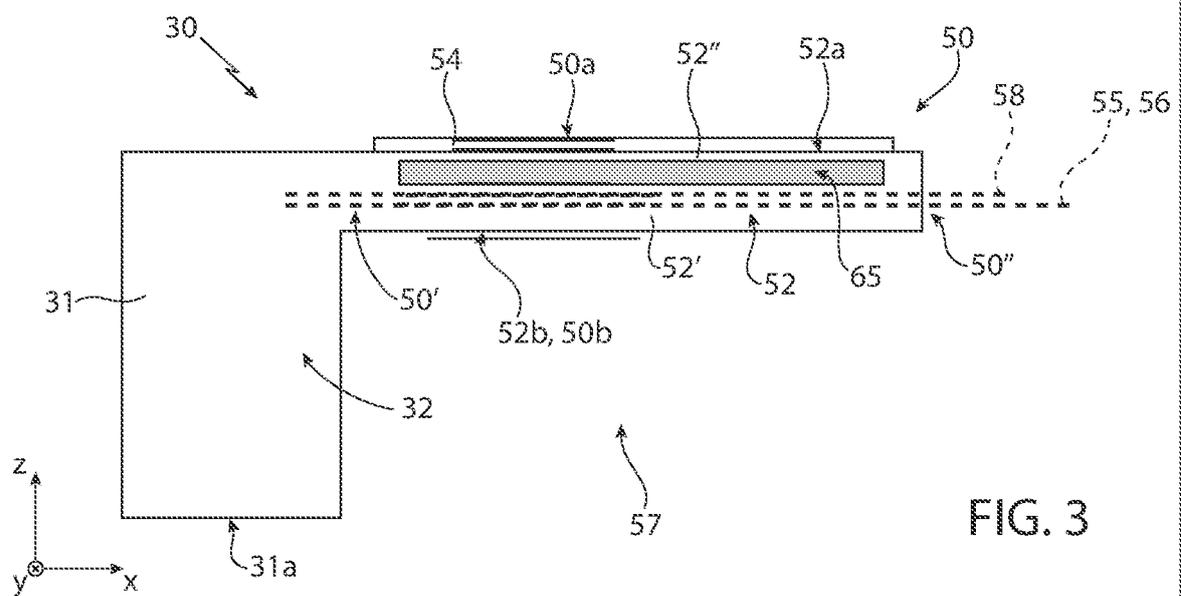
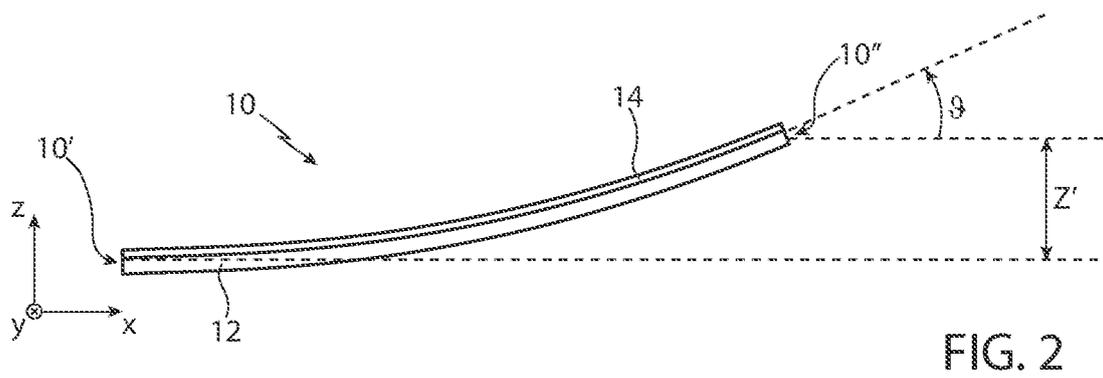
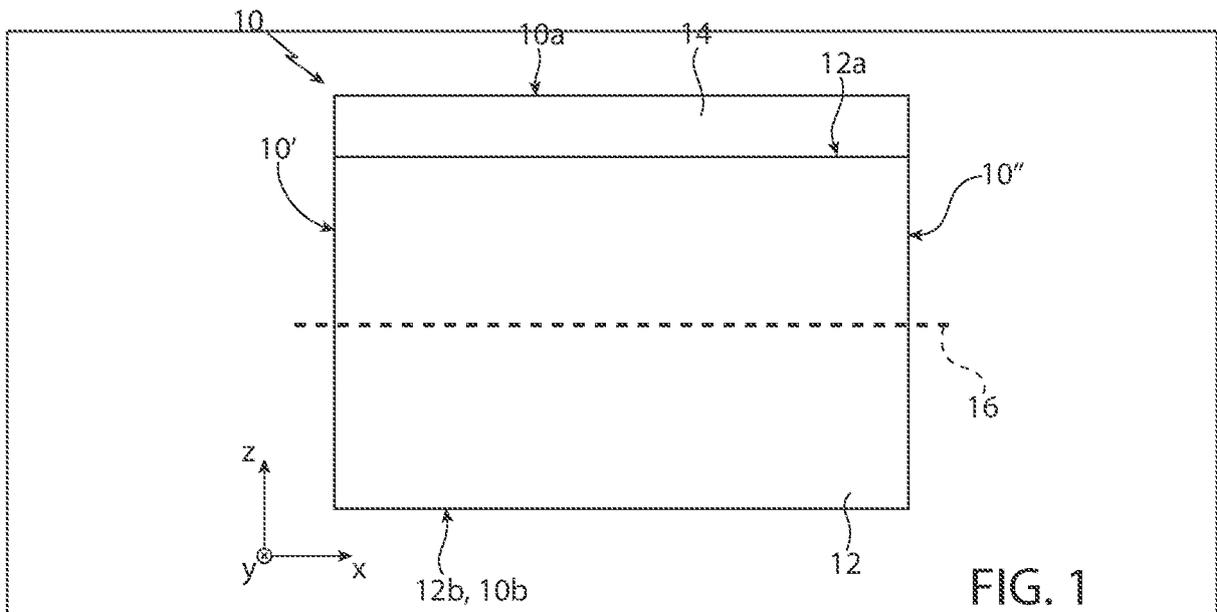
in cui la fase di rimuovere, tramite l'attacco di cavità sepolta, il terzo strato sacrificale (128), il secondo strato sacrificale (114), il primo strato sacrificale (108) e il secondo strato di bloccaggio (102) comprende inoltre
25 rimuovere il primo strato di bloccaggio (104) eseguendo

l'attacco di cavità sepolta anche attraverso la cavità principale (57).

15. Processo di fabbricazione secondo la rivendicazione 13, in cui la fase di formare la cavità principale (57) 5 comprende, prima di rimuovere il terzo strato sacrificale (128), il secondo strato sacrificale (114), il primo strato sacrificale (108) e il secondo strato di bloccaggio (102) tramite l'attacco di cavità sepolta:

- rimuovere, tramite un attacco di cavità principale 10 eseguito a partire dalla seconda superficie (100b) del substrato (100), porzioni del substrato (100) che sono allineate lungo il secondo asse (Z) con il primo strato di bloccaggio (104) e il secondo strato di bloccaggio (102) in modo tale da formare rispettivamente una cavità di lavoro (138) 15 e una seconda trincea di disaccoppiamento (140) che espongono il primo strato di bloccaggio (104) e, rispettivamente, il secondo strato di bloccaggio (102), la cavità di lavoro (138) e la seconda trincea di disaccoppiamento (140) facendo parte della cavità principale (57), e

20 in cui la fase di rimuovere, tramite l'attacco di cavità sepolta, il terzo strato sacrificale (128), il secondo strato sacrificale (114), il primo strato sacrificale (108) e il secondo strato di bloccaggio (102) comprende inoltre rimuovere il primo strato di bloccaggio (104) eseguendo l'attacco di 25 cavità sepolta anche attraverso la cavità principale (57).



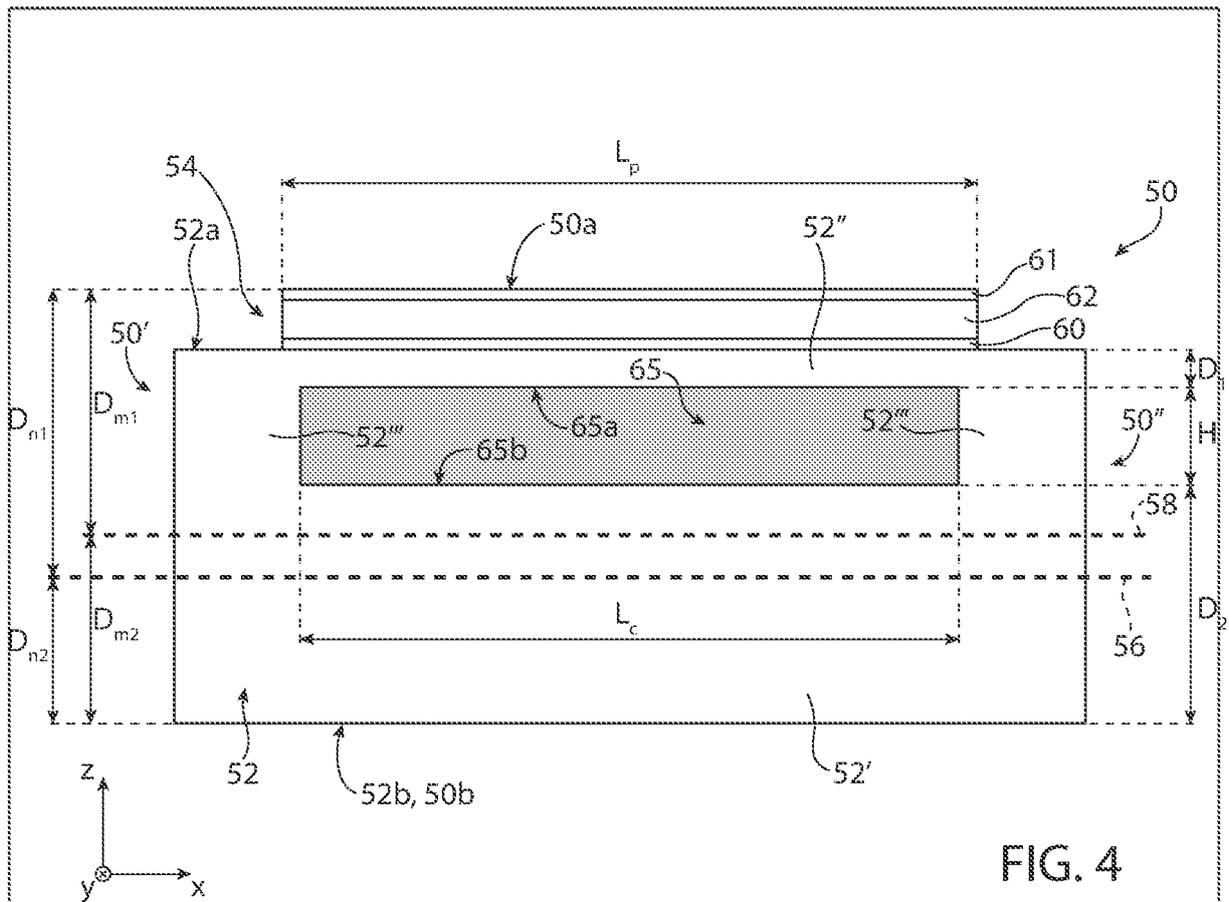


FIG. 4

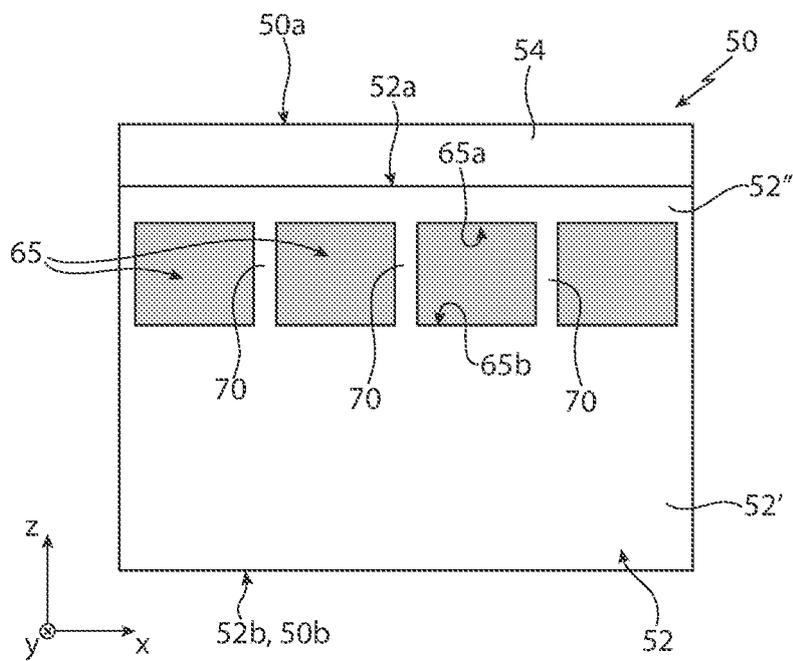


FIG. 5

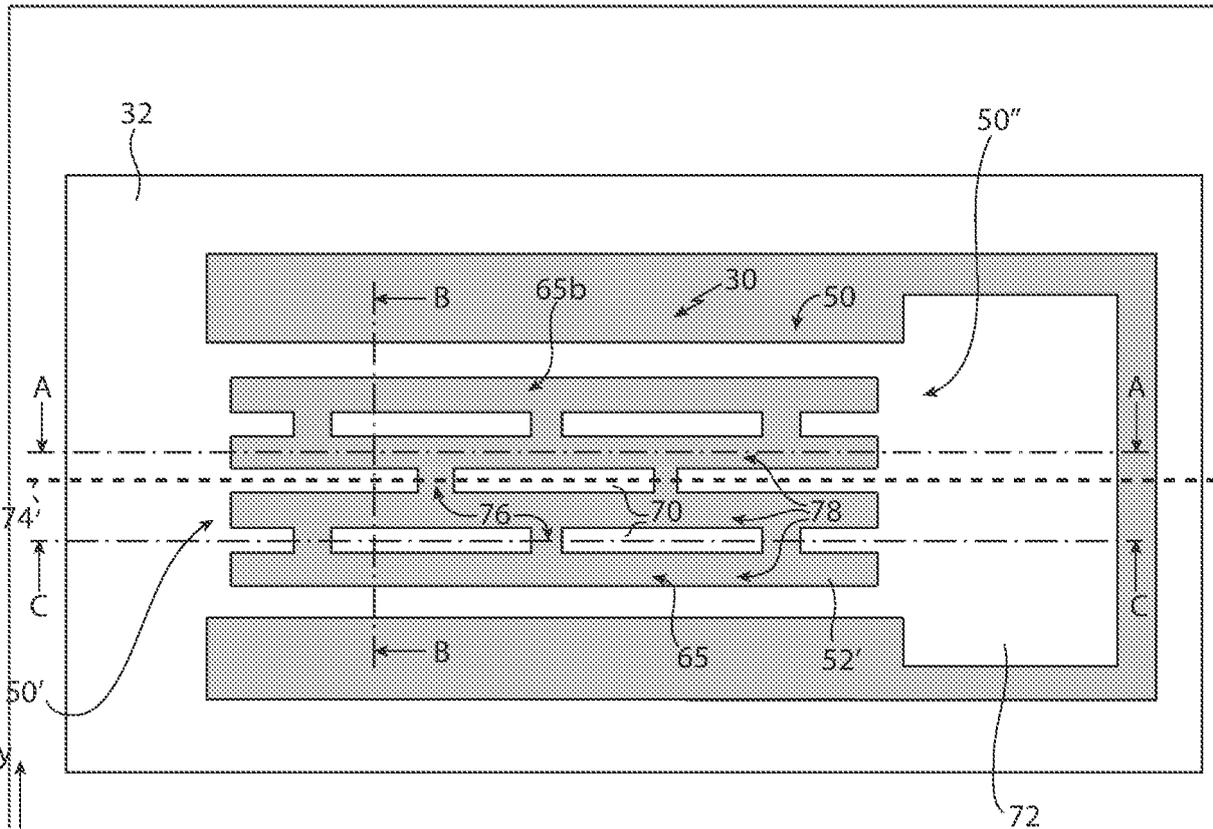


FIG. 6

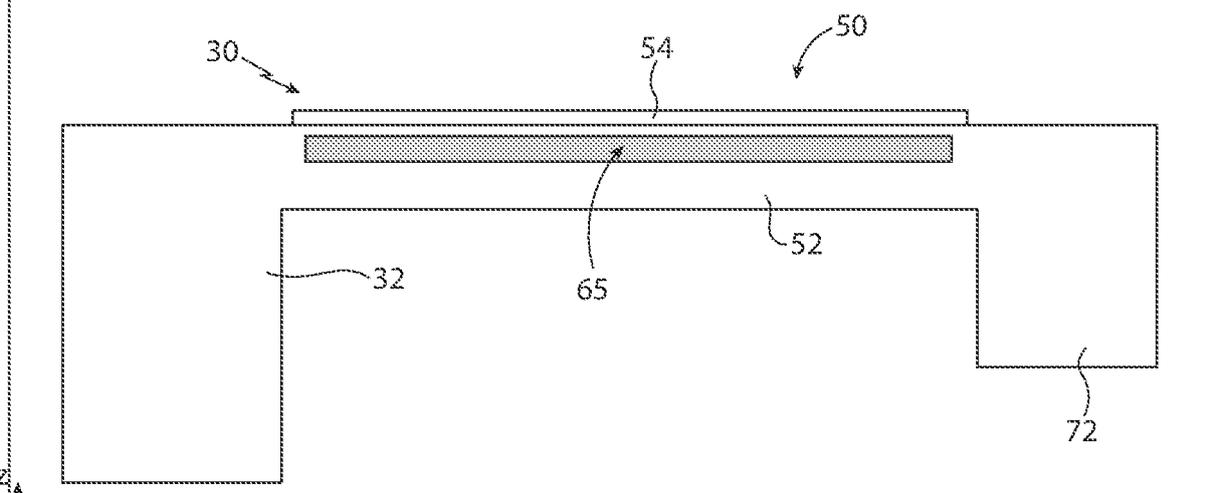


FIG. 7

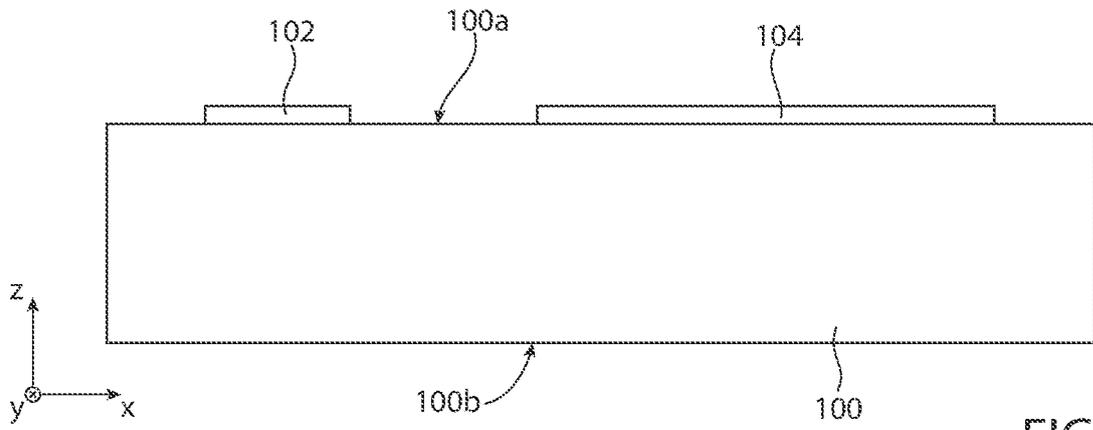


FIG. 8A

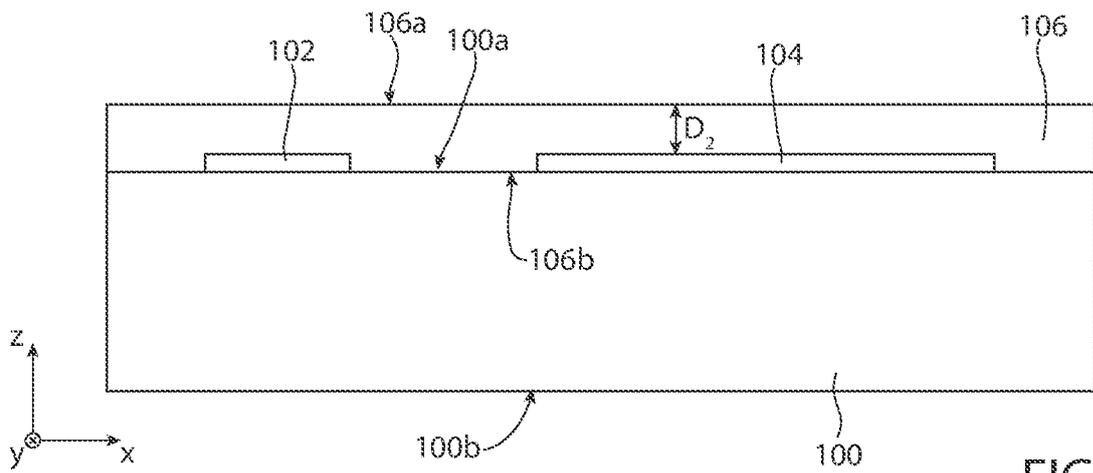


FIG. 8B

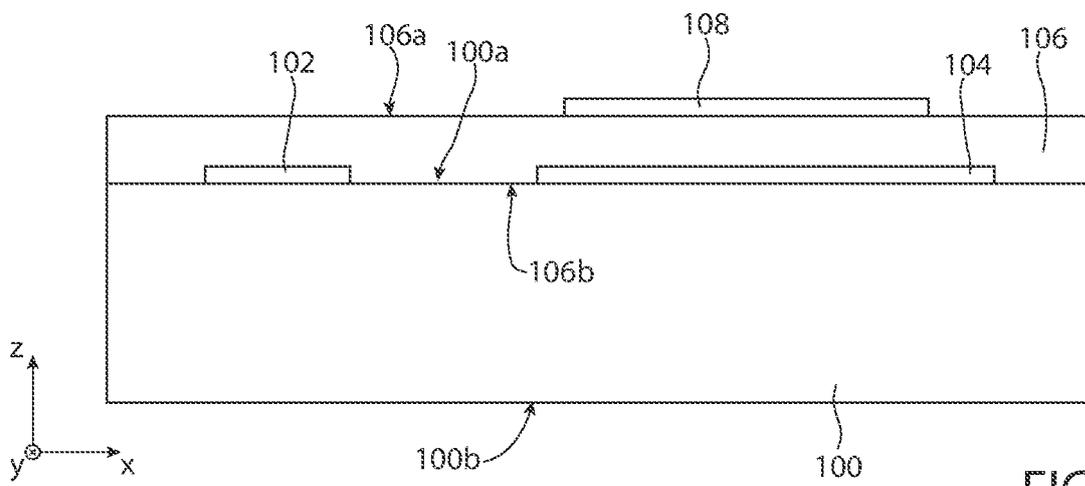


FIG. 8C

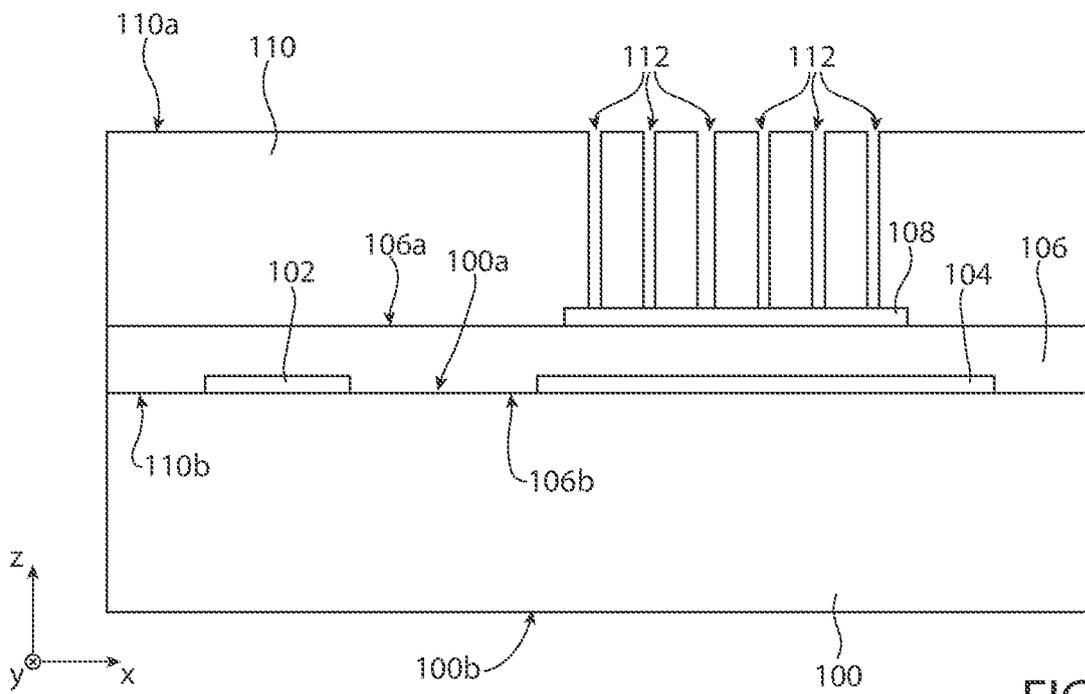


FIG. 8D

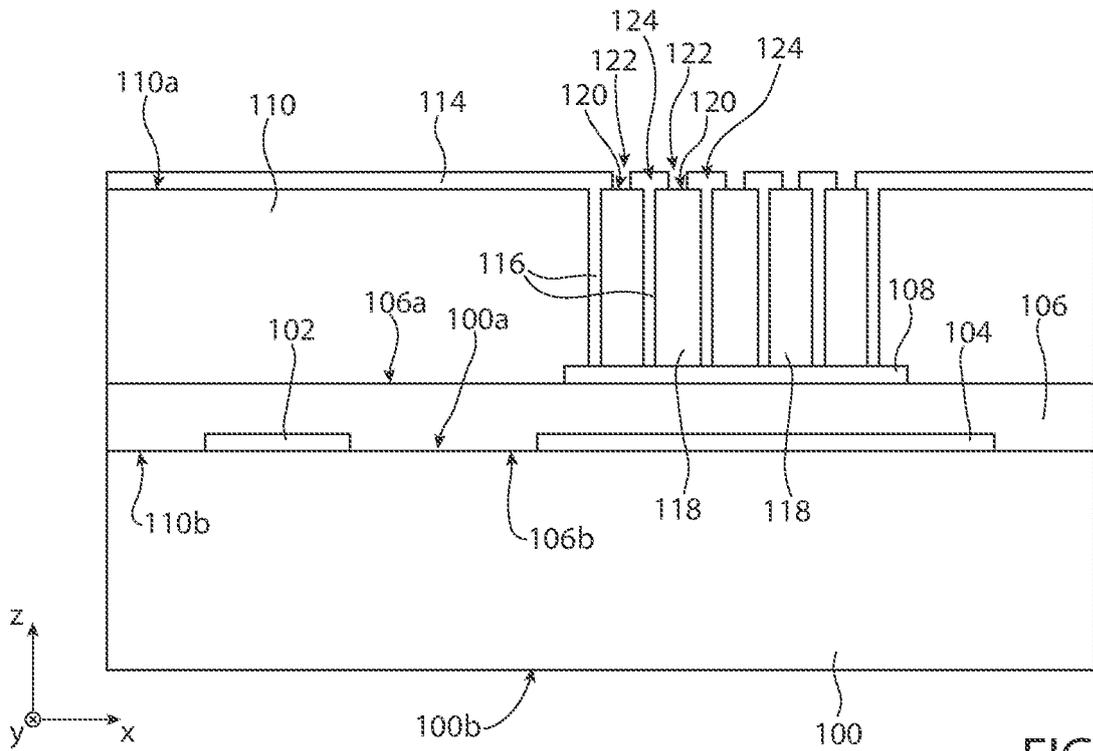


FIG. 8E

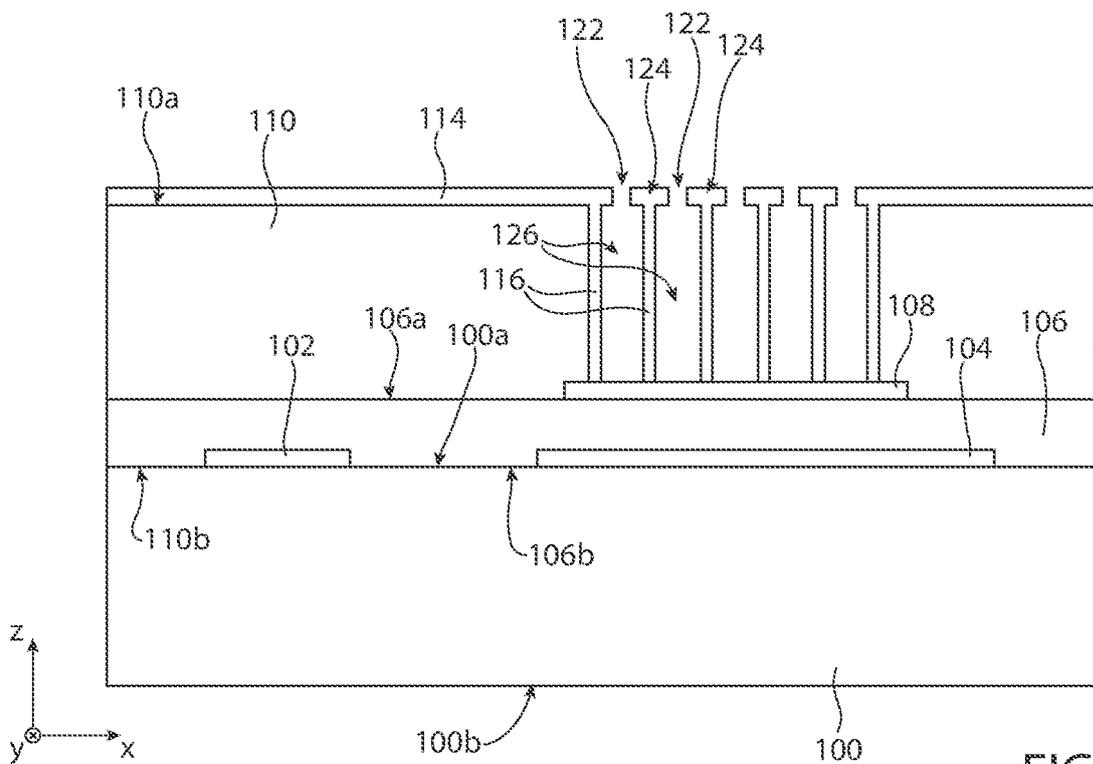


FIG. 8F

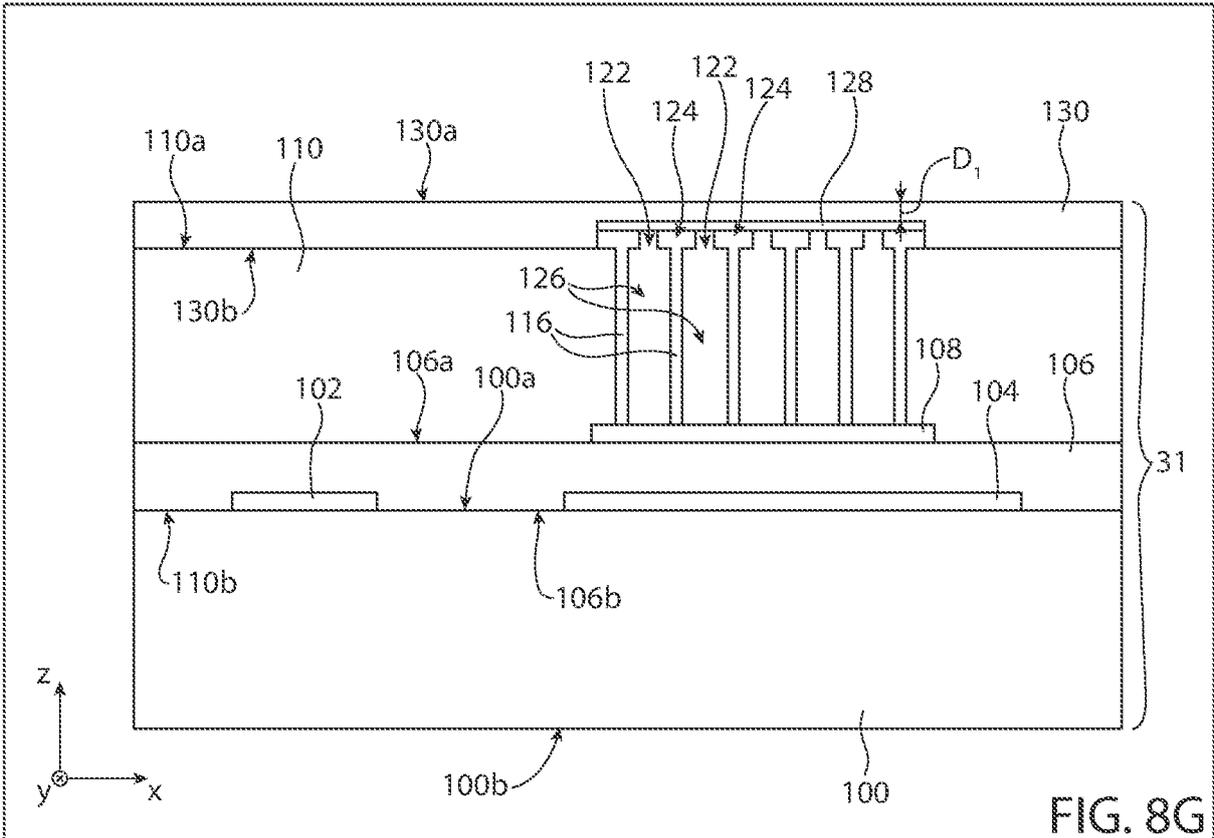


FIG. 8G

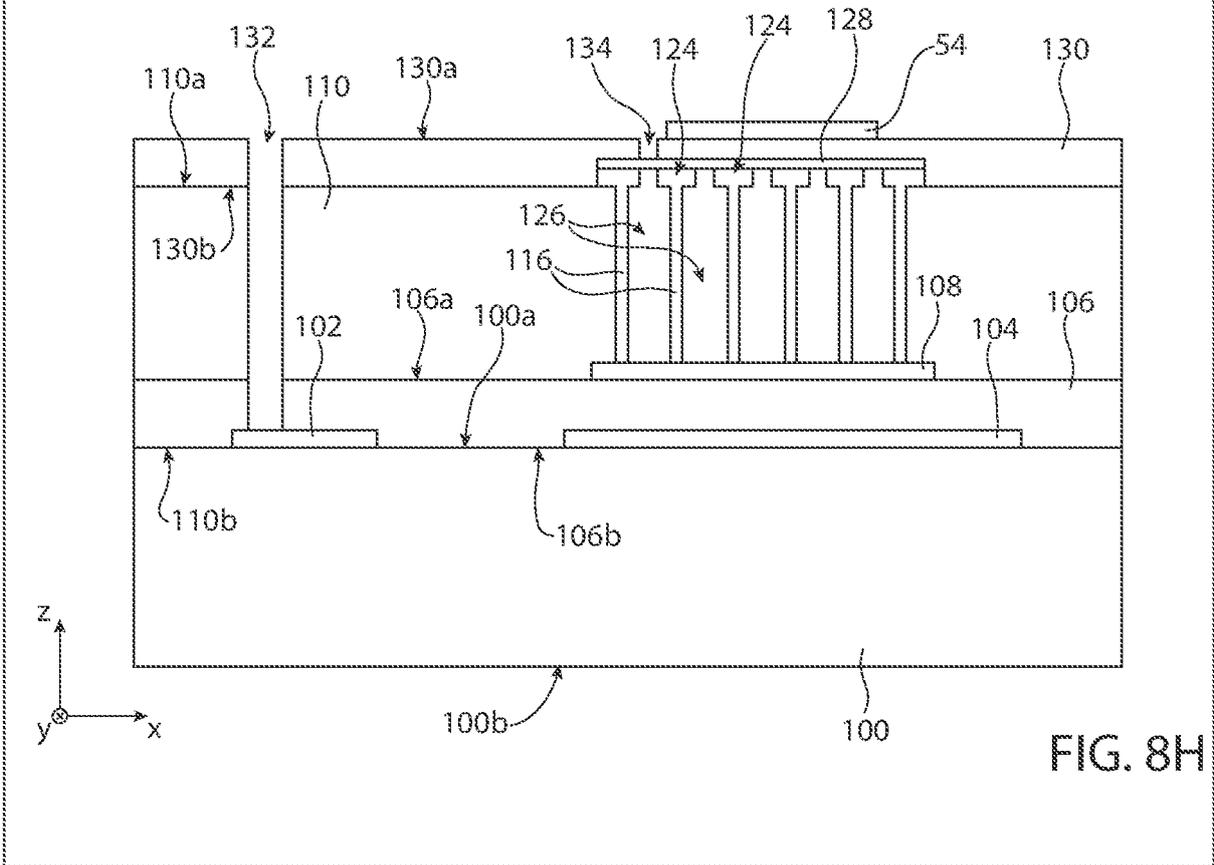


FIG. 8H

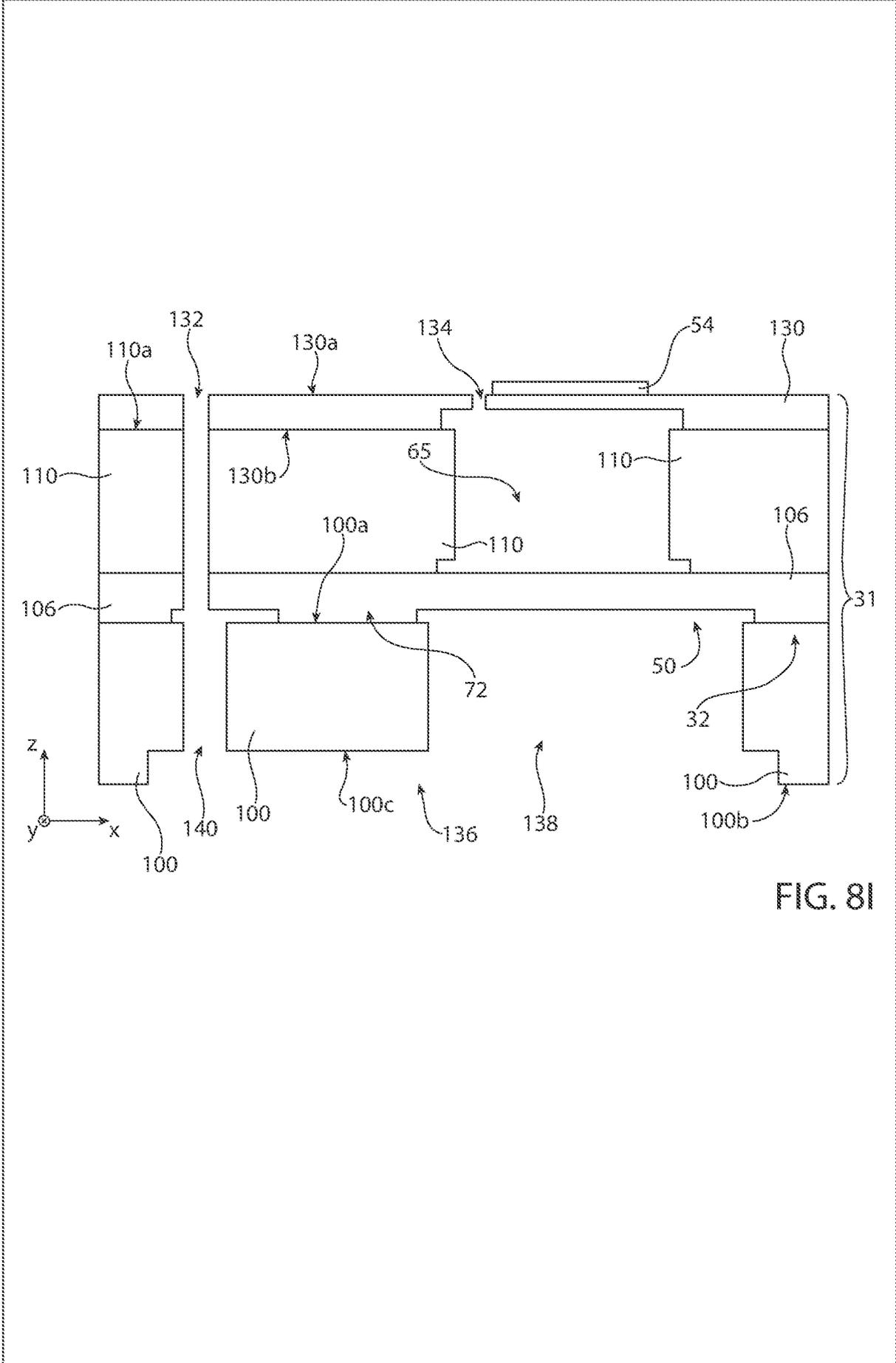


FIG. 81