

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102022000018153
Data Deposito	05/09/2022
Data Pubblicazione	05/03/2024

Classifiche IPC

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
B	06	B	1	06

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	01	H	11	08

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
H	10	N	30	30

Titolo

DISPOSITIVO TRASDUTTORE ULTRASONICO MEMS E RELATIVO PROCESSO DI FABBRICAZIONE

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"DISPOSITIVO TRASDUTTORE ULTRASONICO MEMS E RELATIVO
PROCESSO DI FABBRICAZIONE"

5 di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

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

Inventore: FONCELLINO Francesco

* * *

10 La presente invenzione è relativa ad un dispositivo
trasduttore ultrasonico MEMS, MUT. Inoltre, è relativa ad un
processo di fabbricazione e ad un metodo di controllo del
dispositivo MUT. In particolare, il dispositivo MUT è
modulabile in frequenza e, in uso, emette e/o riceve onde
15 acustiche con frequenza che dipende dalla direzione di
emissione.

Come noto, i sensori di prossimità possono esser
realizzati per mezzo di sensori di tempo di volo ("time-of-
flight"). In particolare, i sensori di tempo di volo possono
20 essere trasduttori ultrasonici, ad esempio realizzati in
tecnologia MEMS ("Micro Electro-Mechanical Systems"). Una
classe nota di trasduttori ultrasonici MEMS utilizza la
tecnologia piezoelettrica per l'emissione e il rilevamento
delle onde acustiche, come meglio descritto nel seguito.

25 In uso, i trasduttori ultrasonici sono immersi in un

fluido (generalmente con bassa densità, es. aria) e vengono controllati per generare e rilevare onde acustiche ultrasoniche (es., con frequenza compresa fra 20 kHz e 500 MHz, ad esempio pari a 2 o 3 MHz). In dettaglio, come mostrato
5 esemplificativamente in figura 1, il trasduttore ultrasonico T genera un'onda ultrasonica (o onda emessa, indicata in figura 1 con il riferimento W_e) che, in presenza di oggetti O posti lungo la direzione di propagazione dell'onda acustica, viene riflessa formando un eco ultrasonico (o onda
10 riflessa, indicata in figura 1 con il riferimento W_r) rilevabile tramite il trasduttore ultrasonico T stesso; la distanza temporale fra l'emissione dell'onda emessa W_e e la ricezione dell'onda riflessa W_r è indicativa di una distanza relativa D fra il trasduttore ultrasonico T e l'oggetto O
15 rilevato. Di conseguenza, misurando il tempo di volo è possibile avere un'informazione riguardo l'oggetto O da rilevare. In maggior dettaglio, il trasduttore ultrasonico T comprende una membrana che, ad esempio per via piezoelettrica, è controllabile per oscillare al fine di
20 generare l'onda emessa W_e . Questa membrana è inoltre configurata per entrare in oscillazione quando l'onda riflessa W_r incide sul trasduttore ultrasonico T; ciò permette di rilevare dunque, ad esempio per via piezoelettrica, l'onda riflessa W_r . In questo caso, il
25 trasduttore ultrasonico T opera sia come emettitore che come

ricevitore, a tempi alterni; ciononostante, è analogamente possibile avere un primo trasduttore ultrasonico T che opera come emettitore e un secondo trasduttore ultrasonico T che opera come ricevitore e che è disposto in modo da rilevare
5 l'onda riflessa W_r causata dall'onda emessa W_e generata dal primo trasduttore ultrasonico T.

La figura 2 mostra schematicamente un dispositivo trasduttore ultrasonico 1 di tipo noto e realizzato in tecnologia MEMS, quindi anche chiamato nel seguito
10 dispositivo MUT ("Micromachined Ultrasonic Transducer").

Ad esempio il dispositivo MUT 1 è integrato in una piastrina ("die") comprendente un corpo semiconduttore 3 di materiale semiconduttore, quale silicio, ad esempio monolitico, avente una prima ed una seconda faccia principale
15 3A, 3B.

Il dispositivo MUT 1 comprende un elemento trasduttore ultrasonico MEMS (o elemento MUT) 5 estendentesi nel corpo semiconduttore 3.

L'elemento MUT 5 comprende una prima camera sepolta 15,
20 disposta in prossimità della prima faccia principale 3A del corpo semiconduttore 3 e a distanza dalla prima faccia principale 3A. La porzione del corpo semiconduttore 3 presente fra la prima camera 15 e la prima faccia principale 3A del corpo semiconduttore 3 forma un corpo di membrana 18
25 con spessore lungo l'asse Z che è uniforme.

Sul corpo di membrana 18, al di sopra della prima faccia principale 3A, è disposto un elemento piezoelettrico 19 di tipo noto che forma, assieme al corpo di membrana 18, una membrana 20. L'elemento piezoelettrico 19 comprende uno
5 strato di materiale piezoelettrico quale PZT, interposto lungo l'asse Z fra due elettrodi.

In uso, il dispositivo MUT 1 è circondato da un mezzo di propagazione (un fluido quale liquido o gas, in particolare aria) in cui si propagano onde acustiche (in
10 dettaglio, onde ultrasoniche) generate o rilevate dal dispositivo MUT 1, che può operare come emettitore e/o ricevitore. In particolare, quando il dispositivo MUT 1 opera come emettitore, l'elemento piezoelettrico 19 viene polarizzato tramite un segnale di pilotaggio in modo da
15 deformarsi elasticamente per causare una rispettiva deformazione elastica della membrana 20 (cioè una vibrazione della membrana 20). Questo genera onde acustiche che si propagano attraverso il mezzo di propagazione. Invece, quando il dispositivo MUT 1 opera come ricevitore, le onde
20 acustiche che raggiungono il dispositivo MUT 1 propagandosi attraverso il mezzo di propagazione mettono in vibrazione la membrana 20 e quindi causano una deformazione elastica dell'elemento piezoelettrico 19, che genera un conseguente segnale elettrico indicativo delle onde acustiche rilevate.

25 In dettaglio, sia in modalità di emissione che in

modalità di ricezione, la membrana 20 vibra ad una frequenza di vibrazione che è circa pari ad una frequenza di risonanza del dispositivo MUT 1. La frequenza di risonanza dipende, in modo di per sé noto, da fattori quali la geometria e i materiali dell'elemento MUT 5 (es., forma e spessore della membrana 20 e materiali del corpo semiconduttore 3 e dell'elemento piezoelettrico 19).

Ciononostante, è noto controllare elettricamente il dispositivo MUT 1 in modo tale da modificare elettricamente la sua frequenza di risonanza, per meglio adattarla all'applicazione richiesta in modo da migliorare le prestazioni del dispositivo MUT.

Ad esempio, questo viene fatto nel dispositivo MUT 1 applicando all'elemento piezoelettrico 19, in aggiunta al segnale di pilotaggio, anche un segnale di modulazione (es., di tipo continuo), al fine di causarne una rispettiva ed ulteriore deformazione elastica di modulazione, che si aggiunge a quella generata dall'elemento piezoelettrico 19 oppure indotta in quest'ultimo (nelle modalità, rispettivamente, di emissione e ricezione). In particolare, il segnale di modulazione è una tensione elettrica di tipo continuo, ad esempio con valore maggiore di 0 V e dipendente nello specifico da fattori quali l'applicazione considerata, la struttura del dispositivo MUT 1 e i materiali con cui esso è realizzato. L'effetto dell'applicazione del segnale

di modulazione è quello di creare uno stress aggiuntivo nella membrana 20 che modifica le proprietà meccaniche e dunque vibrazionali della membrana 20, causando una modifica (cioè "tuning") della frequenza di risonanza.

5 Altre soluzioni note concernono invece l'utilizzo di uno o più ulteriori elementi piezoelettrici sul corpo di membrana 18, affiancati all'elemento piezoelettrico 19. Questi ulteriori elementi piezoelettrici vengono controllati elettricamente in modo indipendente dall'elemento
10 piezoelettrico 19 (ad esempio, tramite il segnale di modulazione precedentemente citato) e sono usati per generare uno stress aggiuntivo nella membrana 20 che modifica le proprietà meccaniche e dunque vibrazionali della membrana 20, causando una modifica della frequenza di risonanza.

15 Un'ulteriore soluzione nota (es., documento di arte nota US 2013/0162102 A1) comprende invece l'utilizzo di una struttura bimorfa per l'elemento piezoelettrico 19. In questa soluzione, l'elemento piezoelettrico 19 comprende una pluralità di pile ("stacks") elettrodo-PZT-elettrodo
20 sovrapposte fra loro lungo l'asse Z e controllabili elettricamente in modo indipendente fra loro. In questo modo, considerando ad esempio due pile sovrapposte, una pila viene utilizzata per generare le onde acustiche (es., è polarizzata con il segnale di pilotaggio) e l'altra pila viene utilizzata
25 per creare lo stress aggiuntivo nella membrana 20 che

modifica le proprietà meccaniche e dunque vibrazionali della membrana 20 (es., è polarizzata con il segnale di modulazione).

Tuttavia, nelle soluzioni note la frequenza delle onde
5 acustiche, misurata fra il dispositivo MUT 1 (cioè il trasduttore ultrasonico T) e l'oggetto O da rilevare, non dipende dalla loro direzione di emissione e dunque dall'angolazione relativa fra il dispositivo MUT 1 e l'oggetto O. In dettaglio, l'angolazione relativa fra il
10 dispositivo MUT 1 e l'oggetto O è data da un angolo di inclinazione θ definito fra la direzione di emissione 24 e una direzione di riferimento 22 ortogonale alla prima faccia principale 3A del corpo semiconduttore 3. Ad esempio, la direzione di emissione 24 unisce l'oggetto O
15 (esemplificativamente considerato puntiforme) e il dispositivo MUT 1 (ad esempio, un centro della membrana 20, preso in un piano XY definito dagli assi X e Y e parallelo alla prima faccia principale 3A del corpo semiconduttore 3). Nelle soluzioni note, la frequenza delle onde acustiche è
20 invariante rispetto all'angolo di inclinazione θ .

Questo è un limite rilevante delle soluzioni note poiché impedisce al dispositivo MUT 1 di eseguire misure selettive su un oggetto O desiderato; al contrario, in presenza di più oggetti O presenti nel campo visivo ("field of view", FOV)
25 del dispositivo MUT 1, quest'ultimo rileva solamente

l'oggetto O più vicino al dispositivo MUT 1. In altre parole
e come mostrato in figura 3, quando sono presenti ad esempio
un primo oggetto O_1 e un secondo oggetto O_2 nel FOV 26 del
dispositivo MUT 1 (il primo oggetto O_1 essendo ad un angolo
5 di inclinazione θ nullo e distando dal dispositivo MUT 1 di
una prima distanza D_1 e il secondo oggetto O_2 essendo ad un
angolo di inclinazione θ non nullo e distando dal dispositivo
MUT 1 di una seconda distanza D_2 minore della prima distanza
 D_1), il dispositivo MUT 1 rileva solamente la seconda
10 distanza D_2 .

Scopo della presente invenzione è fornire un
dispositivo trasduttore ultrasonico MEMS, un processo di
fabbricazione ed un metodo di controllo del dispositivo
trasduttore ultrasonico MEMS, che superino gli inconvenienti
15 dell'arte nota.

Secondo la presente invenzione vengono realizzati un
dispositivo trasduttore ultrasonico MEMS, un processo di
fabbricazione ed un metodo di controllo del dispositivo
trasduttore ultrasonico MEMS, come definiti nelle
20 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
disegni allegati, nei quali:

25 - la figura 1 mostra schematicamente il

funzionamento di un trasduttore ultrasonico di tipo noto;

- la figura 2 è una vista in sezione trasversale di un trasduttore ultrasonico MEMS, MUT, di tipo noto;

- la figura 3 mostra schematicamente la tipologia di
5 rilevamento operata da un MUT di tipo noto;

- le figure 4-7 sono viste in sezione trasversale di rispettive forme di realizzazione di un dispositivo trasduttore ultrasonico MEMS, MUT, dove le figure 4 e 5 sono prese lungo una linea di sezione mostrata in figura 9A e le
10 figure 6 e 7 sono prese lungo una linea di sezione mostrata in figura 9B;

- la figura 8 è una vista in sezione trasversale di un dettaglio del dispositivo MUT delle figure 4-7;

- le figure 9A-9F sono viste dall'alto di rispettive
15 forme di realizzazione del presente dispositivo MUT;

- le figure 10A-10B sono viste in sezione trasversale del dispositivo MUT di figura 6 che ne illustrano il funzionamento in due stati differenti;

- le figure 11A-11B sono viste in sezione
20 trasversale del dispositivo MUT di figura 7 che ne illustrano il funzionamento in due stati differenti;

- la figura 12 è un grafico che mostra, in funzione del tempo, lo spostamento di una membrana di modulazione del presente dispositivo MUT;

- le figure 13A-13D sono viste in sezione
25

trasversale che illustrano rispettive fasi di un processo di fabbricazione del dispositivo MUT di figura 4;

- le figure 14A-14D sono viste in sezione trasversale che illustrano rispettive fasi di un processo di
5 fabbricazione del dispositivo MUT di figura 5; e

- la figura 15 mostra schematicamente la tipologia di rilevamento operata dal presente dispositivo MUT.

In particolare, le figure sono mostrate con riferimento ad un sistema cartesiano triassiale definito da un asse X,
10 un asse Y e un asse Z (o primo asse Z), 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 4 mostra schematicamente un dispositivo
15 trasduttore ultrasonico 50 realizzato in tecnologia MEMS, e quindi anche chiamato nel seguito dispositivo MUT ("Micromachined Ultrasonic Transducer").

Ad esempio il dispositivo MUT 50 è integrato in una piastrina ("die") 52. La piastrina 52 comprende un corpo
20 semiconduttore 53 di materiale semiconduttore, quale silicio, ad esempio monolitico, avente una prima ed una seconda faccia (o superficie) principale 53A, 53B opposte fra loro lungo l'asse Z.

Il dispositivo MUT 50 integra uno o più elementi
25 trasduttori ultrasonici MEMS (o elementi MUT) 55. Nella forma

di realizzazione esemplificativamente mostrata in figura 4 e discussa nel seguito, il dispositivo MUT 50 comprende un solo elemento MUT 55; ciononostante è possibile che il dispositivo MUT 50 comprenda una pluralità di elementi MUT 55.

L'elemento MUT 55 è formato nel corpo semiconduttore 53.

In particolare, l'elemento MUT 55 presenta una cavità di modulazione 65 che si estende nel corpo semiconduttore 53, a partire dalla seconda faccia principale 53B del corpo semiconduttore 53 verso la prima faccia principale 53A del corpo semiconduttore 53, senza raggiungere quest'ultima. In dettaglio, la cavità di modulazione 65 è superiormente delimitata da una prima superficie di fondo 65A del corpo semiconduttore 53 ed è lateralmente delimitata da prime superfici laterali 65B del corpo semiconduttore 53 che uniscono la prima superficie di fondo 65A del corpo semiconduttore 53 con la seconda faccia principale 53B del corpo semiconduttore 53. In altre parole, la cavità di modulazione 65 presenta la prima superficie di fondo 65A e, opposta ad essa lungo l'asse Z, un'apertura attraverso cui la cavità di modulazione 65 comunica con l'esterno del dispositivo MUT 50.

La porzione del corpo semiconduttore 53 estendentesi fra la cavità di modulazione 65 e la prima faccia principale

53A del corpo semiconduttore 53 forma un corpo di membrana 67 dell'elemento MUT 55.

In particolare, il corpo semiconduttore 53 definisce una struttura di supporto 53' che sostiene ed ancora il corpo di membrana 67 in modo tale per cui quest'ultimo è sospeso sulla cavità di modulazione 65. In uso, il corpo di membrana 67 oscilla relativamente alla struttura di supporto 53'.

In dettaglio, il corpo di membrana 67 comprende una porzione centrale 67' definente un corpo di membrana di trasduzione 78, e una o più porzioni estremali 67'' definenti un corpo di membrana di modulazione 68. Le porzioni estremali 67'' del corpo di membrana 67 sono interposte fra la porzione centrale 67' del corpo di membrana 67 e la struttura di supporto 53', in modo da accoppiare queste ultime fra loro. In maggior dettaglio, la porzione centrale 67' del corpo di membrana 67 è interposta, ortogonalmente all'asse Z (es., lungo l'asse X), fra le porzioni estremali 67'' del corpo di membrana 67; in altre parole, il corpo di membrana di trasduzione 78 è, ortogonalmente all'asse Z, interno e, in dettaglio, centrale rispetto al corpo di membrana di modulazione 68.

Più in dettaglio, il corpo di membrana di modulazione 68 presenta spessore, lungo l'asse Z, pari ad un primo spessore S_1 . In maggior dettaglio, il primo spessore S_1 è misurato lungo l'asse Z fra la prima faccia principale 53A

del corpo semiconduttore 53 e la prima superficie di fondo 65A. Ad esempio, il primo spessore S_1 è compreso fra circa 5 μm e circa 50 μm , in particolare fra circa 10 μm e circa 20 μm . In particolare, il corpo di membrana di modulazione 68
5 presenta spessore lungo l'asse Z sostanzialmente uniforme; ad esempio, il primo spessore S_1 è lo spessore minimo del corpo di membrana di modulazione 68 lungo l'asse Z.

Sul corpo di membrana di modulazione 68, al di sopra della prima faccia principale 53A, è presente una struttura
10 piezoelettrica di modulazione 69 dell'elemento MUT 55. La struttura piezoelettrica di modulazione 69 forma, assieme al corpo di membrana di modulazione 68, una membrana di modulazione 73 dell'elemento MUT 55. In particolare, la
15 struttura piezoelettrica di modulazione 69 comprende uno o più elementi piezoelettrici 71 configurati per mettere in vibrazione la membrana di modulazione 73, come meglio descritto nel seguito.

L'elemento MUT 55 presenta inoltre una cavità di trasduzione 75 che si estende nella porzione centrale 67'
20 del corpo di membrana 67.

Nella forma di realizzazione di figura 4, la cavità di trasduzione 75 è di tipo sepolto e, ad esempio, è disposta in corrispondenza della prima faccia principale 53A del corpo semiconduttore 53. In dettaglio, la cavità di trasduzione 75
25 si estende nel corpo semiconduttore 53 in modo da esser

circondato da quest'ultimo, e dunque da esser sepolto in esso ed isolato (cioè non comunicante) rispetto ad un ambiente esterno al dispositivo MUT 50. Ad esempio, la cavità di trasduzione 75 è più vicina alla prima faccia principale 53A del corpo semiconduttore 53 che alla prima superficie di fondo 65A. In dettaglio, la cavità di trasduzione 75 è superiormente delimitata da una prima superficie di cavità 75A del corpo semiconduttore 53 ed è inferiormente delimitata da una seconda superficie di cavità 75B del corpo semiconduttore 53, opposte fra loro lungo l'asse Z rispetto alla cavità di trasduzione 75.

La porzione del corpo semiconduttore 53 (in dettaglio, della porzione centrale 67' del corpo di membrana 67) estendentesi fra la cavità di trasduzione 75 e la prima faccia principale 53A del corpo semiconduttore 53 forma il corpo di membrana di trasduzione 78.

In dettaglio, il corpo di membrana di trasduzione 78 presenta spessore, lungo l'asse Z, pari ad un secondo spessore S_2 minore del primo spessore S_1 . In maggior dettaglio, il secondo spessore S_2 è misurato lungo l'asse Z fra la prima faccia principale 53A del corpo semiconduttore 53 e la prima superficie di cavità 75A del corpo semiconduttore 53. Ad esempio, il secondo spessore S_2 è compreso fra circa 500 nm e circa 8 μm , in particolare fra circa 1 μm e circa 2 μm . In particolare, il corpo di membrana

di trasduzione 78 presenta spessore lungo l'asse Z sostanzialmente uniforme; ad esempio, il secondo spessore S_2 è lo spessore massimo del corpo di membrana di trasduzione 78 lungo l'asse Z.

5 Sul corpo di membrana di trasduzione 78, al di sopra della prima faccia principale 53A, è presente una struttura piezoelettrica di trasduzione 79 dell'elemento MUT 55. La struttura piezoelettrica di trasduzione 79 forma, assieme al corpo di membrana di trasduzione 78, una membrana di
10 trasduzione 83 dell'elemento MUT 55. In particolare, la struttura piezoelettrica di trasduzione 79 comprende uno o più elementi piezoelettrici 71 configurati per generare e/o rilevare vibrazioni della membrana di trasduzione 83, come meglio descritto nel seguito.

15 La struttura piezoelettrica di trasduzione 79 è sovrapposta lungo l'asse Z alla cavità di trasduzione 75 ed è affiancata, ortogonalmente all'asse Z (es., lungo l'asse X), alla struttura piezoelettrica di modulazione 69 che invece è verticalmente sfalsata rispetto alla cavità di
20 trasduzione 75 (cioè non è sovrapposta lungo l'asse Z alla cavità di trasduzione 75).

In dettaglio, l'elemento MUT 55 può presentare simmetria assiale lungo un asse centrale 77 parallelo o coincidente con l'asse Z.

25 In maggior dettaglio, la cavità di trasduzione 75 e la

cavità di modulazione 65 sono concentriche e coassiali lungo l'asse centrale 77. In altre parole, la cavità di trasduzione 75 e la cavità di modulazione 65 (qui esemplificativamente considerate con forma circolare ortogonalmente all'asse Z) hanno, ortogonalmente all'asse Z, centri che sono allineati fra loro lungo l'asse centrale 77. Il corpo di membrana di trasduzione 78 e il corpo di membrana di modulazione 68 sono quindi anch'essi concentrici e coassiali fra loro e rispetto alla cavità di trasduzione 75 e alla cavità di modulazione 65 e, nell'esempio considerato, hanno anch'essi forma circolare. In dettaglio, il corpo di membrana di modulazione 68 è radialmente esterno al corpo di membrana di trasduzione 78 rispetto all'asse centrale 77.

Ad esempio, il corpo di membrana di trasduzione 78 presenta, parallelamente al piano XY (dunque ortogonalmente all'asse Z), area minore del corpo di membrana di modulazione 68; analogamente, la cavità di trasduzione 75 presenta, parallelamente al piano XY, area minore della cavità di modulazione 65.

Inoltre, ad esempio, le cavità 65, 75 e dunque i rispettivi corpi di membrana 68, 78 hanno area (parallelamente al piano XY) maggiore rispetto all'area delle rispettive strutture piezoelettriche 69, 79, in modo tale che le loro zone periferiche, qui esemplificativamente di forma ad anello circolare, sporgono lateralmente rispetto

alle rispettive strutture piezoelettriche 69, 79.

La figura 5 mostra una ulteriore forma di realizzazione del dispositivo MUT 50.

Il dispositivo MUT 50 di figura 5 è analogo a quello di
5 figura 4, tuttavia la cavità di trasduzione 75 non è di tipo
sepolto ma di tipo esposto e si affaccia a (cioè comunica
con) la cavità di modulazione 65.

In dettaglio, la cavità di trasduzione 75 si estende
nel corpo di membrana 67, a partire dalla prima superficie
10 di fondo 65A verso la prima faccia principale 53A del corpo
semiconduttore 53, senza raggiungere quest'ultima. In
dettaglio, la cavità di trasduzione 75 è superiormente
delimitata da una seconda superficie di fondo 75C del corpo
semiconduttore 53, la cui distanza lungo l'asse Z dalla prima
15 faccia principale 53A del corpo semiconduttore 53 definisce
il secondo spessore S_2 ; inoltre, la cavità di trasduzione 75
è lateralmente delimitata da seconde superfici laterali 75D
del corpo semiconduttore 53 che uniscono la terza superficie
di fondo 75C con la prima superficie di fondo 65A. In altre
20 parole, la cavità di trasduzione 75 presenta la seconda
superficie di fondo 75C e, opposta ad essa lungo l'asse Z,
un'apertura che si estende attraverso la prima superficie di
fondo 65A e attraverso cui la cavità di trasduzione 75
comunica con la cavità di modulazione 65. Le cavità 65 e 75
25 sono dunque assialmente adiacenti lungo l'asse centrale 77.

In dettaglio, la prima superficie di fondo 65A e la seconda superficie di fondo 75C sono parte di una superficie posteriore del corpo di membrana 67, ad altezza variabile lungo l'asse Z e in particolare a due livelli (un livello
5 interno e un livello esterno che è radialmente esterno al livello interno ed è assialmente più distante dalla prima faccia principale 53A che il livello interno).

La figura 6 mostra una ulteriore forma di realizzazione del dispositivo MUT 50.

10 Il dispositivo MUT 50 di figura 6 è analogo a quello di figura 4, tuttavia nella porzione centrale 67' del corpo di membrana 67 sono presenti una pluralità di cavità di trasduzione 75 di tipo sepolto, invece che solo una. A scopo esemplificativo, la figura 6 mostra due cavità di trasduzione
15 75; ciononostante, il numero delle cavità di trasduzione 75 può analogamente esser maggiore.

In dettaglio, le cavità di trasduzione 75 sono affiancate fra loro ortogonalmente all'asse Z (es., lungo l'asse X) e sono distanziate fra loro in modo da esser
20 isolate fra loro.

Le porzioni del corpo semiconduttore 53 estendentisi fra ciascuna cavità di trasduzione 75 e la prima faccia principale 53A del corpo semiconduttore 53 formano rispettivi corpi di membrana di trasduzione 78 con spessore,
25 lungo l'asse Z, pari al secondo spessore S_2 .

Su ciascun corpo di membrana di trasduzione 78, al di sopra della prima faccia principale 53A, è presente una rispettiva struttura piezoelettrica di trasduzione 79 dell'elemento MUT 55. Le strutture piezoelettriche di trasduzione 79 sono affiancate fra loro ortogonalmente all'asse Z (es., lungo l'asse X), in particolare a distanza fra loro, e formano, assieme ai rispettivi corpi di membrana di trasduzione 78, rispettive membrane di trasduzione 83 dell'elemento MUT 55. In particolare, ciascuna struttura piezoelettrica di trasduzione 79 comprende uno o più di detti elementi piezoelettrici 71 configurati per generare e/o rilevare vibrazioni della rispettiva membrana di trasduzione 83.

Le strutture piezoelettriche di trasduzione 79 sono dunque sovrapposte lungo l'asse Z alle rispettive cavità di trasduzione 75 e sono affiancate, ortogonalmente all'asse Z (es., lungo l'asse X), alla struttura piezoelettrica di modulazione 69 che invece è verticalmente sfalsata rispetto alle cavità di trasduzione 75.

La figura 7 mostra una ulteriore forma di realizzazione del dispositivo MUT 50.

Il dispositivo MUT 50 di figura 7 è analogo a quello di figura 5, tuttavia sono presenti nella porzione centrale 67' del corpo di membrana 67 una pluralità di cavità di trasduzione 75 di tipo esposto, invece che solo una. A scopo

esemplificativo, la figura 7 mostra due cavità di trasduzione 75; ciononostante, il numero delle cavità di trasduzione 75 può analogamente esser maggiore.

In dettaglio, le cavità di trasduzione 75 sono
5 affiancate fra loro ortogonalmente all'asse Z (es., lungo l'asse X) e sono distanziate fra loro in modo da esser isolate fra loro.

Le porzioni del corpo semiconduttore 53 estendentisi fra ciascuna cavità di trasduzione 75 e la prima faccia
10 principale 53A del corpo semiconduttore 53 formano rispettivi corpi di membrana di trasduzione 78 con spessore, lungo l'asse Z, pari al secondo spessore S_2 .

Su ciascun corpo di membrana di trasduzione 78, al di sopra della prima faccia principale 53A, è presente una
15 rispettiva struttura piezoelettrica di trasduzione 79 dell'elemento MUT 55. Le strutture piezoelettriche di trasduzione 79 sono affiancate fra loro ortogonalmente all'asse Z (es., lungo l'asse X), in particolare a distanza fra loro, e formano, assieme ai rispettivi corpi di membrana
20 di trasduzione 78, rispettive membrane di trasduzione 83 dell'elemento MUT 55. In particolare, ciascuna struttura piezoelettrica di trasduzione 79 comprende uno o più di detti elementi piezoelettrici 71 configurati per generare e/o rilevare vibrazioni della rispettiva membrana di trasduzione
25 83.

Le strutture piezoelettriche di trasduzione 79 sono dunque sovrapposte lungo l'asse Z alle rispettive cavità di trasduzione 75 e sono affiancate, ortogonalmente all'asse Z (es., lungo l'asse X), alla struttura piezoelettrica di modulazione 69 che invece è verticalmente sfalsata rispetto alle cavità di trasduzione 75.

La figura 8 mostra, a scopo esemplificativo e non limitante, un esempio di struttura dell'elemento piezoelettrico 71 della struttura piezoelettrica di modulazione 69 e della struttura piezoelettrica di trasduzione 79. Ad esempio, in figura 8 viene esemplificativamente mostrato l'elemento piezoelettrico 71 della struttura piezoelettrica di trasduzione 79.

In dettaglio, l'elemento piezoelettrico 71 è formato al di sopra di uno strato isolante 181, ad esempio formato dalla sovrapposizione di uno strato di ossido di silicio cresciuto termicamente e di uno strato di dielettrico, e copre l'intera prima faccia principale 53A del corpo semiconduttore 53. Al di sopra dello strato isolante 181, si estende una pila 182 comprendente: un elettrodo inferiore 183, di materiale elettricamente conduttore, ad esempio di titanio (Ti) o platino (Pt); una regione piezoelettrica a film sottile 191; ed un elettrodo superiore 184, ad esempio di TiW. L'elettrodo inferiore 183 è in contatto elettrico con una prima linea di contatto 188 (ad esempio, è formata nello stesso strato e

sagomata tramite fasi fotolitografiche note). Un primo ed un secondo strato di dielettrico 185, 186, ad esempio di ossido di silicio e nitruro di silicio depositato per CVD (Chemical Vapour Deposition) si estendono sulla pila 182. Una seconda
5 linea di contatto 189 di materiale conduttore, ad esempio di alluminio e/o rame, si estende al di sopra degli strati di dielettrico 185, 186 e in un'apertura 187 di questi, per contattare elettricamente l'elettrodo superiore 184. Opzionalmente, uno strato di passivazione 190, ad esempio di
10 ossido di silicio e/o nitruro depositato per CVD, copre tutta la superficie superiore della piastrina 52, ad eccezione delle aperture di connessione elettrica (al di sopra di piazzole di contatto dell'elemento MUT 55). In pratica, le linee di contatto 188, 189 formano connessioni elettriche e
15 consentono: al fine di generare l'onda emessa W_e da parte dell'elemento MUT 55, la connessione elettrica di uno degli elettrodi 183, 184 (ad esempio l'elettrodo inferiore 183) ad un potenziale di riferimento, tipicamente a massa, e la polarizzazione dell'altro degli elettrodi 183, 184 (ad
20 esempio dell'elettrodo superiore 184) ad una tensione di attuazione alternata; oppure, al fine di rilevare l'onda riflessa W_r , l'acquisizione di una differenza di potenziale di rilevamento fra gli elettrodi 183 e 184 indotta dall'incidenza dell'onda riflessa W_r sulla membrana di
25 trasduzione 83.

Le figure 9A-9F mostrano schematicamente viste dall'alto del dispositivo MUT 50. In altre parole, queste viste sono prese ortogonalmente all'asse Z, cioè parallelamente al piano XY.

5 In particolare, la figura 9A mostra una vista dall'alto del dispositivo MUT 50 di figura 4 o 5. Come esemplificativamente mostrato in figura 9A, il corpo di membrana di trasduzione 78, la struttura piezoelettrica di trasduzione 79, la cavità di trasduzione 75, il corpo di
10 membrana di modulazione 68, la struttura piezoelettrica di modulazione 69 e la cavità di modulazione 65 hanno, parallelamente al piano XY, forma sostanzialmente circolare e sono concentrici fra loro.

La figura 9B mostra una vista dall'alto del dispositivo
15 MUT 50 di figura 6 o 7. Come esemplificativamente mostrato in figura 9B, il corpo di membrana di trasduzione 78, le strutture piezoelettriche di trasduzione 79, le cavità di trasduzione 75, il corpo di membrana di modulazione 68, la struttura piezoelettrica di modulazione 69 e la cavità di
20 modulazione 65 hanno, parallelamente al piano XY, forma sostanzialmente circolare. La struttura piezoelettrica di modulazione 69, il corpo di membrana di modulazione 68 e la cavità di modulazione 65 sono concentriche fra loro, così
25 come ciascuna struttura piezoelettrica di trasduzione 79 con il rispettivo corpo di membrana di trasduzione 78 e la

rispettiva cavità di trasduzione 75. In particolare, i corpi di membrana di trasduzione 78 sono circondati dal corpo di membrana di modulazione 68 che li unisce alla struttura di supporto 53'.

5 Sebbene le figure 9A e 9B mostrino forme circolari degli elementi illustrati, altre forme poligonali chiuse possono esser analogamente utilizzate (es., forma triangolare, quadrata, esagonale, ecc.). Inoltre, altre forme e disposizioni della struttura piezoelettrica di modulazione
10 69 e della cavità di modulazione 65 relativamente alle strutture piezoelettriche di trasduzione 79 e alle cavità di trasduzione 75 sono possibili.

Ad esempio, nella forma di realizzazione di figura 9C il corpo di membrana di modulazione 68 è formato da una
15 pluralità di dette porzioni estremali 67" del corpo di membrana 67. In vista dall'alto, la porzione centrale 67' del corpo di membrana 67 ha forma circolare e le porzioni estremali 67" hanno forma a settore anulare e sono disposte circonferenzialmente una adiacente all'altra. In
20 particolare, ciascuna porzione estrema 67" ha una prima estremità e una seconda estremità che sono opposte fra loro lungo l'estensione principale della porzione estrema 67" (cioè circonferenzialmente alla porzione centrale 67'); le porzioni estremali 67" sono fissate alla struttura di
25 supporto 53' tramite le rispettive prime estremità e sono

fissate alla porzione centrale 67' del corpo di membrana 67 tramite le rispettive seconde estremità. Inoltre, la porzione centrale 67' del corpo di membrana 67 comprende una pluralità di cavità di trasduzione 75, ad esempio disposte
5 in modo sostanzialmente omogeneo nella porzione centrale 67', e dunque comprende una rispettiva pluralità di corpi di membrana di trasduzione 78, ciascuno sovrastato verticalmente dalla rispettiva struttura piezoelettrica di trasduzione 79.

10 Nella forma di realizzazione di figura 9D, la porzione centrale 67' presenta forma quadrangolare, in particolare quadrata. Il corpo di membrana di modulazione 68 è formato da una pluralità di dette porzioni estremali 67'' del corpo di membrana 67, collegate ai vertici della porzione centrale
15 67'. Ad esempio, le porzioni estremali 67'' presentano anch'esse forma quadrangolare, in particolare quadrata o rettangolare, e hanno le rispettive prime estremità fissate alla struttura di supporto 53' e le rispettive seconde estremità fissate ai vertici della porzione centrale 67'.

20 Analogamente alla figura 9C, la porzione centrale 67' del corpo di membrana 67 comprende una pluralità di cavità di trasduzione 75 (e dunque di corpi di membrana di trasduzione 78), ad esempio disposte in modo sostanzialmente omogeneo nella porzione centrale 67'.

25 Nella forma di realizzazione di figura 9E, la porzione

centrale 67' presenta forma quadrangolare, in particolare quadrata. Il corpo di membrana di modulazione 68 è formato da due porzioni estremali 67" del corpo di membrana 67, ad esempio di forma quadrangolare (in particolare
5 rettangolare), che presentano estensione longitudinale sostanzialmente pari alla lunghezza dei lati della porzione centrale 67' e che sono collegate rispettivamente a lati opposti fra loro della porzione centrale 67'. Analogamente alla figura 9C, la porzione centrale 67' del corpo di
10 membrana 67 comprende una pluralità di cavità di trasduzione 75 (e dunque di corpi di membrana di trasduzione 78), ad esempio disposte in modo sostanzialmente omogeneo nella porzione centrale 67'.

Nella forma di realizzazione di figura 9F, il corpo di
15 membrana di modulazione 68 è formato da una pluralità di dette porzioni estremali 67" del corpo di membrana 67. In vista dall'alto, la porzione centrale 67' del corpo di membrana 67 ha forma esagonale e le porzioni estremali 67" hanno forma sostanzialmente rettangolare e sono affiancate
20 ciascuna ad un rispettivo lato della porzione centrale 67', in modo da esser disposte circonferenzialmente una adiacente all'altra. In particolare, le porzioni estremali 67" sono fissate alla struttura di supporto 53' tramite le rispettive prime estremità e sono fissate ai vertici della porzione
25 centrale 67' del corpo di membrana 67 tramite le rispettive

seconde estremità. Analogamente alla figura 9C, la porzione centrale 67' del corpo di membrana 67 comprende una pluralità di cavità di trasduzione 75 (e dunque di corpi di membrana di trasduzione 78), ad esempio disposte in modo
5 sostanzialmente omogeneo nella porzione centrale 67'.

In uso, il dispositivo MUT 50 opera in modo analogo ai dispositivi noti (es., al trasduttore ultrasonico T di figura 1). In particolare, in uso il dispositivo MUT 50 è circondato da un mezzo di propagazione (un fluido quale liquido o gas,
10 in particolare aria) in cui si propagano onde acustiche (in dettaglio, onde ultrasoniche) generate o rilevate dal dispositivo MUT 50.

Quando l'elemento MUT 55 è operato in una propria modalità di emissione (cioè lavora come attuatore), le
15 membrane 73 e 83 vengono poste in vibrazione per mezzo delle rispettive strutture piezoelettriche 69 e 79 e, come meglio descritto nel seguito, le vibrazioni dell'una o più membrane di trasduzione 83 (relativamente a loro posizioni a riposo) causano la generazione e la propagazione nel mezzo di
20 propagazione delle onde acustiche.

In particolare, una prima tensione di attuazione, di tipo alternato (es., ad una prima frequenza di attuazione compresa fra circa 1 kHz e circa 100 kHz, ad esempio pari a circa 10 kHz, e con voltaggio pari a circa 40 V), viene
25 applicata fra gli elettrodi 183 e 184 dell'uno o più elementi

piezoelettrici 71 della struttura piezoelettrica di
modulazione 69 mentre una seconda tensione di attuazione, di
tipo alternato (es., ad una seconda frequenza di attuazione
maggiore della prima frequenza di attuazione e compresa fra
5 circa 500 kHz e circa 50 MHz, ad esempio pari a circa 5 MHz,
e con voltaggio pari a circa 40 V), viene applicata fra gli
elettrodi 183 e 184 dell'uno o più elementi piezoelettrici
71 della struttura piezoelettrica di trasduzione 79.
L'applicazione della prima tensione di attuazione causa, in
10 modo alternato, la contrazione e l'espansione della regione
piezoelettrica a film sottile 191 della struttura
piezoelettrica di modulazione 69 e dunque la conseguente
deflessione della membrana di modulazione 73 in direzione
verticale, alternativamente in allontanamento e in
15 avvicinamento alla cavità di modulazione 65. L'applicazione
della seconda tensione di attuazione causa, in modo
alternato, la contrazione e l'espansione della regione
piezoelettrica a film sottile 191 della struttura
piezoelettrica di trasduzione 79 e dunque la conseguente
20 deflessione della membrana di trasduzione 83 in direzione
verticale, alternativamente in allontanamento e in
avvicinamento alla cavità di trasduzione 75. Poiché la prima
frequenza di attuazione è molto minore della seconda
frequenza di attuazione (es., di circa due ordini di
25 grandezza), la vibrazione della membrana di modulazione 73

avviene molto più lentamente della vibrazione della membrana di trasduzione 83 (cioè la prima frequenza di vibrazione della membrana di modulazione 73 è minore, es. di circa due ordini di grandezza, rispetto alla seconda frequenza di
5 vibrazione della membrana di trasduzione 83). In particolare, la prima frequenza di vibrazione è pari alla prima frequenza di attuazione e la seconda frequenza di vibrazione è pari alla seconda frequenza di attuazione. La contemporanea vibrazione delle membrane 73 e 83 causa la
10 generazione di onde acustiche che si propagano nel mezzo di propagazione a partire dal dispositivo MUT 50 e che dipendono simultaneamente dal movimento di entrambe le membrane 73 e 83.

In particolare, il movimento vibrazionale della
15 membrana di modulazione 73 si somma al movimento vibrazionale della membrana di trasduzione 83, generando così una modulazione della frequenza delle onde acustiche emesse rispetto al caso noto in cui è presente il solo movimento vibrazionale della membrana di trasduzione 83 (nel seguito
20 chiamata frequenza di riferimento delle onde acustiche).

Infatti, come esemplificativamente mostrato nelle figure 10A e 10B facenti esemplificativamente riferimento alla forma di realizzazione del dispositivo MUT 50 di figura 6, quando la membrana di modulazione 73 si deforma in
25 direzione opposta rispetto alla cavità di modulazione 65

(figura 10A), i fronti d'onda che si propagano in direzione opposta rispetto alla cavità di modulazione 65 (nel seguito, anche chiamati primi fronti d'onda delle prime onde acustiche 80a) sono più ravvicinati fra loro poiché il movimento della
5 membrana di modulazione 73 è concorde con la direzione di propagazione delle prime onde acustiche 80a; di conseguenza, la frequenza delle prime onde acustiche 80a è maggiore della frequenza di riferimento. Quando invece la membrana di modulazione 73 si deforma verso la cavità di modulazione 65
10 (figura 10B), i primi fronti d'onda sono più distanziati fra loro poiché il movimento della membrana di modulazione 73 è discorde con la direzione di propagazione delle prime onde acustiche 80a; di conseguenza, la frequenza delle prime onde acustiche 80a è minore della frequenza di riferimento.

15 Le figure 11A e 11B mostrano invece il funzionamento del dispositivo MUT 50 di figura 7. In questo caso, il comportamento delle prime onde acustiche 80a (emesse dal fronte del dispositivo MUT 50) è analogo a quello descritto con riferimento alle figure 10A e 10B. Inoltre, poiché le
20 cavità di trasduzione 75 sono esposte verso il retro del dispositivo MUT 50 e si affacciano alla cavità di modulazione 65, le vibrazioni delle membrane di trasduzione 83 generano anche seconde onde acustiche 80b che si propagano attraverso la cavità di modulazione 65. In particolare, quando la
25 membrana di modulazione 73 si deforma in direzione opposta

rispetto alla cavità di modulazione 65 (figura 11A), i secondi fronti d'onda delle seconde onde acustiche 80b sono più distanziati fra loro poiché il movimento della membrana di modulazione 73 è discorde con la direzione di propagazione delle seconde onde acustiche 80b; di conseguenza, la frequenza delle seconde onde acustiche 80b è minore della frequenza di riferimento. Quando invece la membrana di modulazione 73 si muove verso la cavità di modulazione 65 (figura 11B), i secondi fronti d'onda sono più ravvicinati fra loro poiché il movimento della membrana di modulazione 73 è concorde con la direzione di propagazione delle seconde onde acustiche 80b; di conseguenza, la frequenza delle seconde onde acustiche 80b è maggiore della frequenza di riferimento.

In altre parole, il movimento vibrazionale della membrana di modulazione 73 modula la frequenza delle onde acustiche 80a, 80b tramite effetto Doppler. L'effetto Doppler è il cambiamento nella frequenza di un'onda in relazione ad un osservatore che si muove rispetto alla sorgente dell'onda (o viceversa). In questo caso, è la sorgente dell'onda (cioè la membrana di modulazione 73) che si muove rispetto all'osservatore (es., l'oggetto da rilevare), generando così l'effetto Doppler. Ciò significa che la frequenza delle onde acustiche dipende dalla direzione di emissione, come meglio descritto nel seguito.

In dettaglio, la figura 12 mostra il movimento
vibrazionale della membrana di modulazione 73, in
particolare mostra, in funzione del tempo, lo spostamento Z_m
della membrana di modulazione 73 lungo l'asse Z rispetto
5 alla sua posizione a riposo (definita quando la prima
tensione di attuazione non viene applicata). Il movimento
vibrazionale della membrana di modulazione 73 è di tipo
sostanzialmente sinusoidale attorno alla sua posizione a
riposo (considerata nulla in figura 12). Di conseguenza, il
10 dispositivo MUT 50 può esser utilizzato in modalità di
emissione in intervalli temporali T^* predefiniti e
periodici, nei quali la membrana di modulazione 73 si muove
lungo l'asse Z in modo approssimativamente lineare; in
particolare, gli intervalli temporali T^* sono gli intervalli
15 di tempo in cui lo spostamento Z_m della membrana di
modulazione 73 è compreso fra circa il 60% del suo valore
massimo e circa il 60% del suo valore minimo, o viceversa,
e in cui, ad un istante centrale di ciascun intervallo
temporale T^* , la membrana di modulazione 73 è nella sua
20 posizione a riposo. In altre parole, negli intervalli
temporali T^* lo spostamento Z_m è sostanzialmente lineare nel
tempo. Dunque, in primi intervalli temporali T^*_{1} in cui la
membrana di modulazione 73 si muove in direzione opposta
rispetto alla cavità di modulazione 65, il dispositivo MUT
25 50 opera in linearità come precedentemente descritto con

riferimento alle figure 10A e 11A (dunque la frequenza delle prime onde acustiche 80a è maggiore e, eventualmente, la frequenza delle seconde onde acustiche 80b è minore), mentre in secondi intervalli temporali T^*_2 in cui la membrana di modulazione 73 si muove verso la cavità di modulazione 65, il dispositivo MUT 50 opera in linearità come precedentemente descritto con riferimento alle figure 10B e 11B (dunque la frequenza delle prime onde acustiche 80a è minore e, eventualmente, la frequenza delle seconde onde acustiche 80b è maggiore).

Quando invece l'elemento MUT 55 è operato in una propria modalità di ricezione (cioè lavora come sensore), le onde acustiche provenienti dal mezzo di propagazione (cioè le onde riflesse W_r) incidono sull'una o più membrane di trasduzione 83 e ne inducono la vibrazione. Questa vibrazione causa uno stress nell'elemento piezoelettrico 71 dell'una o più strutture piezoelettriche di trasduzione 79 che generano a loro volta differenze di potenziale elettrico fra gli elettrodi 183 e 184, indicative della vibrazione della membrana di trasduzione 83 indotta dalle onde acustiche incidenti. In particolare, la frequenza della vibrazione indotta di ciascuna membrana di trasduzione 83 può esser modulata mettendo in vibrazione la membrana di modulazione 73 come precedentemente descritto, cioè polarizzando ciascuna struttura piezoelettrica di modulazione 69 tramite

la prima tensione di attuazione e misurando le differenze di potenziale elettrico indotte nelle strutture piezoelettriche di trasduzione 79 durante gli intervalli temporali T^* . Anche nella modalità di ricezione valgono dunque considerazioni
5 sull'effetto Doppler che sono analoghe a quelle precedentemente discusse con riferimento alla modalità di emissione.

La modalità di ricezione e la modalità di emissione sono alternative fra loro: il dispositivo MUT 50 può
10 funzionare dunque solo in ricezione, solo in emissione, oppure sia in ricezione che in emissione ma in periodi di tempo alternati fra loro.

Le figure 13A-13D mostrano fasi di un processo di fabbricazione del dispositivo MUT 50 di figura 4.

15 Inizialmente, figura 13A, in una fetta 100 di materiale semiconduttore, ad esempio silicio monocristallino, viene realizzata la cavità di trasduzione 75. Ad esempio, allo scopo può essere utilizzato il processo di fabbricazione descritto nel brevetto europeo EP1577656 e riassunto
20 brevemente sotto.

In dettaglio, al di sopra della fetta 100 (cioè su una sua superficie superiore) viene realizzata una prima maschera 101 di resist presentante, in corrispondenza di una regione della fetta 100 destinata ad ospitare la cavità di
25 trasduzione 75, aperture disposte ad esempio a reticolo a

nido d'ape. Usando la prima maschera 101, viene eseguito un attacco chimico anisotropo della fetta 100, in modo da formare una pluralità di trincee 102, di profondità di ad esempio 10 μm , comunicanti tra loro e delimitanti una pluralità di colonne (anche chiamate strutture a colonna) 103 di silicio.

Successivamente, figura 13B, la prima maschera 101 viene rimossa e viene eseguita una crescita epitassiale in ambiente riducente. Di conseguenza, uno strato epitassiale, ad esempio di tipo N e di spessore di circa 10 μm , cresce al di sopra delle colonne 103, chiudendo superiormente le trincee 102.

Viene quindi eseguita una fase di trattamento termico ("annealing"), ad esempio per 30 minuti a 1190°C, preferibilmente in atmosfera di idrogeno, o, in alternativa, di azoto.

Come discusso nel documento sopra citato, la fase di annealing provoca una migrazione degli atomi di silicio che tendono a portarsi in una posizione di minore energia. Di conseguenza, anche grazie alla distanza ravvicinata fra le colonne 103, gli atomi di silicio di queste migrano completamente e si forma la cavità di trasduzione 75. Al di sopra della cavità di trasduzione 75 rimane uno strato di silicio con il secondo spessore S_2 lungo l'asse Z, formato in parte da atomi di silicio cresciuti epitassialmente ed in

parte da atomi di silicio migrati e formante uno strato di
chiusura 105 di silicio monocristallino (che diventerà il
corpo di membrana di trasduzione 78). La fetta 100 così
lavorata forma il corpo semiconduttore 53.

5 In seguito, figura 13C, sulla prima faccia principale
53A del corpo semiconduttore 53 vengono realizzati gli
elementi piezoelettrici 71 delle strutture piezoelettriche
69 e 79, in modo di per sé noto. In particolare, gli elementi
piezoelettrici 71 sono affiancati fra loro lungo l'asse X in
10 modo tale per cui l'elemento piezoelettrico 71 della
struttura piezoelettrica di trasduzione 79 è sovrapposto
verticalmente (lungo l'asse Z) alla cavità di trasduzione 75
mentre l'uno o più elementi piezoelettrici 71 della struttura
piezoelettrica di modulazione 69 sono verticalmente sfalsati
15 rispetto alla cavità di trasduzione 75.

Ad esempio ed in modo non mostrato in dettaglio in
figura 13C, sulla prima faccia principale 53A del corpo
semiconduttore 53 viene deposto un primo strato dielettrico
che forma lo strato isolante 181, ad esempio comprendente
20 materiale isolante quale SiO_2 e ad esempio con spessore di
circa 1 μm ; in particolare, questo avviene eseguendo un
processo di ossidazione termica della fetta 100 che porta
alla formazione del primo strato dielettrico sulla prima
faccia principale 53A del corpo semiconduttore 53 e di un
25 secondo strato dielettrico (analogo al primo strato

dielettrico) sulla seconda faccia principale 53B del corpo
semiconduttore 53. Sullo strato isolante 181 vengono
realizzati gli elementi piezoelettrici 19. Ad esempio,
vengono realizzati dapprima gli elettrodi 183 e le prime
5 linee di contatto 188, utilizzando tecniche di deposizione
e mascheratura note. Quindi, vengono depositati in
successione uno strato piezoelettrico a film sottile (ad
esempio di PZT - Pb, Zr, TiO₃) e uno strato di elettrodo,
che vengono definiti mediante tecniche di mascheratura e
10 definizione note in modo da formare le regioni
piezoelettriche a film sottile 191 e gli elettrodi superiori
184. Poi, il primo e il secondo strato dielettrico 185, 186
vengono depositati e definiti, formando le aperture 187;
vengono realizzate le seconde linee di contatto 189 e viene
15 depositato e definito lo strato di passivazione 190, che
viene così aperto sulle piazzole di contatto (non mostrate).

In seguito, figura 13D, viene formata la cavità di
modulazione 65 eseguendo un primo attacco ("etch") profondo
del silicio dal retro, in corrispondenza della seconda faccia
20 principale 53B del corpo semiconduttore 53.

In particolare, il secondo strato dielettrico viene
lavorato, tramite tecniche note di patterning di ossido, per
realizzare una seconda maschera 106 di ossido presentante
un'apertura che espone la regione del corpo semiconduttore
25 53 da rimuovere per formare la cavità di modulazione 65. In

dettaglio, questa regione è allineata lungo l'asse Z con le strutture piezoelettriche 69 e 79 e dunque con la cavità di trasduzione 75. Usando la seconda maschera 106, viene eseguito il primo attacco profondo (es., attacco chimico anisotropo) del corpo semiconduttore 53, in modo da formare la cavità di modulazione 65 di profondità lungo l'asse Z tale da definire il corpo di membrana di modulazione 68 avente il primo spessore S_1 .

Dopo l'effettuazione delle fasi finali di fabbricazione, includenti l'apertura dei contatti e il taglio della fetta 100, si ottiene il dispositivo MUT 50 di figura 4.

Analogamente, è anche possibile ottenere il dispositivo MUT 50 di figura 6, in particolare realizzando più cavità di trasduzione 75 affiancate fra loro lungo l'asse X e formando rispettive strutture piezoelettriche di trasduzione 79 sopra le cavità di trasduzione 75.

Le figure 14A-14D mostrano fasi del processo di fabbricazione del dispositivo MUT 50 di figura 5.

Inizialmente, figura 14A, si dispone una fetta 100 di materiale semiconduttore, ad esempio silicio monocristallino, che forma il corpo semiconduttore 53.

Sulla prima faccia principale 53A del corpo semiconduttore 53 vengono realizzati, figura 14B, gli elementi piezoelettrici 71 delle strutture piezoelettriche

69 e 79, in modo di per sé noto. In particolare, gli elementi piezoelettrici 71 sono affiancati fra loro lungo l'asse X. Ad esempio ed in modo non mostrato in dettaglio in figura 14B, la formazione degli elementi piezoelettrici 71 avviene analogamente a quanto precedentemente descritto con riferimento alla figura 13C.

In seguito, figura 14C, viene formata la cavità di modulazione 65 eseguendo un primo attacco ("etch") profondo del silicio dal retro, in corrispondenza della seconda faccia principale 53B del corpo semiconduttore 53.

In particolare, il secondo strato dielettrico precedentemente formato viene lavorato, tramite tecniche note di patterning di ossido, per realizzare una prima maschera 107 di ossido presentante un'apertura che espone la regione del corpo semiconduttore 53 da rimuovere per formare la cavità di modulazione 65. In dettaglio, questa regione è allineata lungo l'asse Z con le strutture piezoelettriche 69 e 79. Usando la prima maschera 107, viene eseguito il primo attacco profondo (es., attacco chimico anisotropo) del corpo semiconduttore 53, in modo da formare la cavità di modulazione 65 di profondità lungo l'asse Z tale da definire il corpo di membrana di modulazione 68 avente il primo spessore S_1 .

In seguito, figura 14D, viene formata la cavità di trasduzione 75 eseguendo un secondo attacco profondo del

silicio dal retro, in corrispondenza della prima superficie di fondo 65A.

In particolare, sulla prima superficie di fondo 65A del corpo semiconduttore 53 viene formato un terzo strato dielettrico, analogamente a come descritto per il secondo strato dielettrico. Il terzo strato dielettrico realizza una seconda maschera 109 di ossido presentante un'apertura che espone la regione del corpo semiconduttore 53 da rimuovere per formare la cavità di trasduzione 75. In dettaglio, questa regione è allineata lungo l'asse Z con la struttura piezoelettrica di trasduzione 79. Usando la seconda maschera 109, viene eseguito il secondo attacco profondo (es., attacco chimico anisotropo) del corpo semiconduttore 53, in modo da formare la cavità di trasduzione 75 di profondità lungo l'asse Z tale da definire il corpo di membrana di trasduzione 78 avente il secondo spessore S_2 .

Dopo l'effettuazione delle fasi finali di fabbricazione, includenti l'apertura dei contatti e il taglio della fetta 100, si ottiene il dispositivo MUT 50 di figura 5.

Analogamente, è anche possibile ottenere il dispositivo MUT 50 di figura 7, in particolare realizzando più strutture piezoelettriche di trasduzione 79 affiancate fra loro lungo l'asse X e formando rispettive cavità di trasduzione 75 allineate lungo l'asse Z alle strutture piezoelettriche di

trasduzione 79.

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

5 In particolare, il dispositivo MUT 50 genera onde acustiche la cui frequenza è modulabile, permettendo una migliore corrispondenza delle onde acustiche generate con le proprietà del mezzo di propagazione e dell'oggetto da rilevare e garantendo così migliori prestazioni del
10 dispositivo MUT 50 in una maggiore gamma di applicazioni.

Inoltre, è stato verificato che il dispositivo MUT 50 permette di generare dei fronti d'onda (es., delle prime o delle seconde onde acustiche 80a e 80b) con una frequenza f_0 che dipende dalla direzione di emissione delle onde
15 acustiche. In altre parole, la frequenza f_0 è funzione dell'angolo di inclinazione θ considerato fra la direzione di emissione delle onde acustiche e la direzione di riferimento ortogonale alla prima faccia principale 53A del corpo semiconduttore 53 (es., l'asse centrale 77). In
20 particolare, l'angolo di inclinazione θ è definito fra la direzione di riferimento e una direzione di emissione che è indicativa della posizione dell'oggetto O da rilevare relativamente al dispositivo MUT 50 e che, ad esempio, unisce l'oggetto O da rilevare (esemplificativamente considerato
25 puntiforme) e il dispositivo MUT 50 (in dettaglio, un punto

di riferimento del dispositivo MUT 50, quale un centro della porzione centrale 67' del corpo di membrana 67 in vista dall'alto).

In particolare, applicando la prima tensione di
5 attuazione con profilo sinusoidale alla prima frequenza di
attuazione, la membrana di modulazione 73 oscilla alla prima
frequenza di vibrazione (qui indicata con il riferimento f_{r1}
e pari alla prima frequenza di attuazione) e lo spostamento
 Z_m della membrana di modulazione 73 lungo l'asse Z è di tipo
10 sinusoidale.

In questo caso, la velocità di oscillazione V_m della
membrana di modulazione 73 è pari a $V_m(t) = 2\pi f_{r1} Z_1 \sin(2\pi f_{r1} t)$,
dove Z_1 è l'ampiezza di oscillazione della membrana di
modulazione 73 (cioè il doppio del valore massimo dello
15 spostamento della membrana di modulazione 73 lungo l'asse Z
rispetto alla sua posizione a riposo). Inoltre, $V_s(t, \theta) = V_m(t) \cdot$
 $\cos(\theta)$ è la velocità relativa fra il dispositivo MUT 50 e
l'oggetto O da rilevare (cioè fra sorgente acustica e
osservatore) ed è funzione dell'angolo di inclinazione θ .

20 Inoltre, le onde acustiche emesse o rilevate presentano
una frequenza (qui indicata con il riferimento f_o e anche
chiamata nel seguito frequenza di onde acustiche) che è pari
a:

$$f_o(t, \theta) = \frac{f_{r2}}{1 - V_s(t, \theta)/c}$$

dove c è la velocità del suono nel fluido in cui è immerso il dispositivo MUT 50 (ad esempio nel caso di applicazioni in aria la velocità del suono è circa 340 m/s) e f_{r2} è la seconda frequenza di vibrazione della membrana di trasduzione 83 (pari alla seconda frequenza di attuazione).

In maggior dettaglio, le onde acustiche emesse o rilevate presentano una differenza di frequenza D_f , relativamente alla seconda frequenza di attuazione f_{r2} , che è pari a:

$$D_f(t, \theta) = f_o(t, \theta) - f_{r2} = f_{r2} \cdot \left(\frac{1}{1 - \frac{V_s(t, \theta)}{c}} - 1 \right) = \frac{f_{r2}}{\frac{c}{V_s(t, \theta)} - 1}$$

Inoltre, $V_{m,max} = 2\pi f_{r1} Z_1$ è il valore massimo della velocità di oscillazione V_m della membrana di modulazione 73.

A scopo puramente esemplificativo e non limitante, vengono riportati i seguenti esempi realizzativi del dispositivo MUT 50. In aggiunta a quanto sopra indicato, si indica con $D_{f,max}$ il valore massimo della differenza di frequenza D_f e con $D_{f,min}$ il valore minimo della differenza di frequenza D_f , dove $D_{f,max}$ e $D_{f,min}$ possono esser diversi fra loro in valore assoluto e sono definiti dalle seguenti espressioni:

$$D_{f,max} = \frac{f_{r2}}{\frac{c}{2\pi f_{r1} Z_1} - 1}$$

$$D_{f,min} = -\frac{f_{r2}}{\frac{c}{2\pi f_{r1} Z_1} + 1}$$

Secondo un primo esempio, $f_{r1}=10\text{kHz}$,

$Z_1=50\mu\text{m}$, $f_{r2}=5\text{MHz}$, $D_{f,\text{max}}=46.6\text{kHz}$, $D_{f,\text{min}}=-45.7\text{kHz}$. Secondo un
 secondo esempio, $f_{r1}=10\text{kHz}$, $Z_1=50\mu\text{m}$, $f_{r2}=500\text{kHz}$, $D_{f,\text{max}}=4.6\text{kHz}$,
 $D_{f,\text{min}}=-4.6\text{kHz}$. Secondo un terzo esempio, $f_{r1}=25\text{kHz}$, $Z_1=10\mu\text{m}$,
 $f_{r2}=500\text{kHz}$, $D_{f,\text{max}}=2.3\text{kHz}$, $D_{f,\text{min}}=-2.3\text{kHz}$. Secondo un quarto
 5 esempio, $f_{r1}=25\text{kHz}$, $Z_1=50\mu\text{m}$, $f_{r2}=500\text{kHz}$, $D_{f,\text{max}}=11.8\text{kHz}$, $D_{f,\text{min}}=-$
 11.3kHz . Secondo un quinto esempio, $f_{r1}=25\text{kHz}$, $Z_1=50\mu\text{m}$,
 $f_{r2}=1\text{MHz}$, $D_{f,\text{max}}=23.6\text{kHz}$, $D_{f,\text{min}}=-22.6\text{kHz}$. Secondo un sesto
 esempio, $f_{r1}=5\text{kHz}$, $Z_1=50\mu\text{m}$, $f_{r2}=1\text{MHz}$, $D_{f,\text{max}}=4.6\text{kHz}$, $D_{f,\text{min}}=-$
 4.6kHz . Inoltre, l'ampiezza Z_2 di oscillazione della membrana
 10 di trasduzione 83 (cioè il doppio del valore massimo dello
 spostamento della membrana di trasduzione 83 lungo l'asse Z
 rispetto alla sua posizione a riposo) è ad esempio pari a
 circa qualche nanometro o decina di nanometri, ad esempio è
 pari a circa 10 nm.

15 Poiché la frequenza di onde acustiche f_0 dipende dalla
 direzione di emissione delle onde acustiche, il dispositivo
 MUT 50 permette di eseguire misure selettive ad angoli di
 inclinazione θ prestabiliti e dunque permette di
 discriminare fra più oggetti O presenti nel field of view,
 20 FOV, del dispositivo MUT 50. Questo permette di non avere
 necessariamente la misura dell'oggetto presente nel FOV e
 più vicino al dispositivo MUT 50, ma piuttosto di poter
 discriminare fra direzioni di emissione diverse e dunque di
 poter misurare la distanza anche di oggetti O che non sono
 25 i più vicini al dispositivo MUT 50.

Ad esempio, la figura 15 mostra il dispositivo MUT 50 con il suo FOV 96 definito da un primo intervallo di angolo di inclinazione (cioè definito da $\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}$). Nel FOV 96 sono presenti un primo ed un secondo oggetto O_1 e O_2 ad angoli di inclinazione θ diversi (cioè presentano direzioni di emissione diverse), dove il secondo oggetto O_2 è più vicino al dispositivo MUT 50 del primo oggetto O_1 . Potendo discriminare l'angolo di inclinazione θ , il dispositivo MUT può misurare la distanza anche del primo oggetto O_1 e non solo del secondo oggetto O_2 . Questo avviene generando le onde emesse W_e solo in un secondo intervallo di angolo di inclinazione minore del primo intervallo di angolo di inclinazione (modalità di emissione), oppure considerando solo le onde riflesse W_r in questo secondo intervallo di angolo di inclinazione (modalità di ricezione).

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, il dispositivo MUT 50 può comprendere una pluralità di elementi MUT 55 disposti affiancati reciprocamente, ad esempio allineati su righe e colonne in

vista dall'alto. Ad esempio ed in modo non mostrato, ciascun elemento MUT 55 è collegato indipendentemente, tramite connessioni elettriche e piazzole di contatto, ad un'unità di comando (generalmente realizzata in una diversa piastrina, ad esempio realizzata come ASIC, "Application Specific Integrated Circuit"). In alternativa, gli elementi MUT 55 possono essere collegati a gruppi, in cui gli elementi MUT 55 di un gruppo vengono comandati separatamente e i gruppi sono comandabili separatamente, per ridurre il numero e semplificare le connessioni elettriche.

RIVENDICAZIONI

1. Dispositivo trasduttore ultrasonico MEMS, MUT, (50),
comprendente un corpo semiconduttore (53) di materiale
semiconduttore che definisce una struttura di supporto
5 (53'), ha una prima (53A) ed una seconda (53B) faccia
principale opposte fra loro lungo un primo asse (Z) ed
integra almeno un elemento MUT (55) che include:

- una cavità di modulazione (65) che si estende nel
corpo semiconduttore (53) a partire dalla seconda faccia
10 principale (53B) verso la prima faccia principale (53A);

- un corpo di membrana (67) del corpo semiconduttore
(53), che si estende lungo il primo asse (Z) fra la cavità
di modulazione (65) e la prima faccia principale (53A) e che
è fissato alla struttura di supporto (53') in modo da essere
15 sospeso sulla cavità di modulazione (65), il corpo di
membrana (67) comprendendo una porzione centrale (67') e una
o più porzioni estremali (67'') che sono interposte,
ortogonalmente al primo asse (Z), fra la porzione centrale
(67') e la struttura di supporto (53') e che accoppiano
20 reciprocamente la porzione centrale (67') e la struttura di
supporto (53'), la porzione centrale (67') definendo almeno
un corpo di membrana di trasduzione (78) e l'una o più
porzioni estremali (67'') definendo un corpo di membrana di
modulazione (68);

25 - una struttura piezoelettrica di modulazione (69) che

si estende sul corpo di membrana di modulazione (68), sopra la prima faccia principale (53A), e forma con il corpo di membrana di modulazione (68) una membrana di modulazione (73) dell'elemento MUT (55), sospesa sulla cavità di
5 modulazione (65);

- almeno una cavità di trasduzione (75) che si estende nella porzione centrale (67') del corpo di membrana (67), il corpo di membrana di trasduzione (78) estendendosi lungo il primo asse (Z) fra la cavità di trasduzione (75) e la prima
10 faccia principale (53A); e

- una struttura piezoelettrica di trasduzione (79) che si estende sul corpo di membrana di trasduzione (78), sopra la prima faccia principale (53A), e forma con il corpo di membrana di trasduzione (78) una membrana di trasduzione
15 (83) dell'elemento MUT (55), sospesa sulla cavità di trasduzione (75),

in cui il corpo di membrana di modulazione (68) presenta lungo il primo asse (Z) un primo spessore (S_1) e il corpo di membrana di trasduzione (78) presenta lungo il primo asse
20 (Z) un secondo spessore (S_2) minore del primo spessore (S_1),

in cui la struttura piezoelettrica di modulazione (69) è controllabile elettricamente per mettere in vibrazione la membrana di modulazione (73) ad una prima frequenza di vibrazione e la struttura piezoelettrica di trasduzione (79)
25 è configurata per generare e/o rilevare la vibrazione della

membrana di trasduzione (83) ad una seconda frequenza di vibrazione maggiore della prima frequenza di vibrazione, per emettere e/o ricevere, da parte della membrana di trasduzione (83), onde acustiche ad una frequenza (f_o) che dipende dalla
5 prima frequenza di vibrazione e dalla seconda frequenza di vibrazione.

2. Dispositivo MUT secondo la rivendicazione 1, in cui il primo spessore (S_1) è uno spessore minimo del corpo di membrana di modulazione (68) lungo il primo asse (Z) e il
10 secondo spessore (S_2) è uno spessore massimo del corpo di membrana di trasduzione (78) lungo il primo asse (Z).

3. Dispositivo MUT secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui la cavità di trasduzione (75) è di tipo sepolto, oppure
in cui la cavità di trasduzione (75) è di tipo esposto
15 e si affaccia alla cavità di modulazione (65).

4. Dispositivo MUT secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui la struttura piezoelettrica di trasduzione (79) è sovrapposta lungo il primo asse (Z) alla cavità di trasduzione (75) e la struttura
20 piezoelettrica di modulazione (69) è sfalsata, lungo il primo asse (Z), rispetto alla cavità di trasduzione (75), la struttura piezoelettrica di trasduzione (79) e la struttura piezoelettrica di modulazione (69) essendo affiancate fra loro ortogonalmente al primo asse (Z).

25 5. Dispositivo MUT secondo una qualsiasi delle

rivendicazioni precedenti, in cui l'elemento MUT (55) presenta simmetria assiale lungo un asse centrale (77) parallelo a, o coincidente con, il primo asse (Z).

6. Dispositivo MUT secondo la rivendicazione 5, in cui
5 il corpo di membrana di modulazione (68) e il corpo di membrana di trasduzione (78) sono concentrici e coassiali lungo l'asse centrale (77), il corpo di membrana di modulazione (68) essendo radialmente esterno al corpo di membrana di trasduzione (78) rispetto all'asse centrale
10 (77).

7. Dispositivo MUT secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui la porzione centrale (67') definisce una pluralità di detti corpi di membrana di trasduzione (78) affiancati fra loro ortogonalmente al primo
15 asse (Z), e

in cui l'elemento MUT (55) comprende:

- una rispettiva pluralità di dette cavità di trasduzione (75) che si estendono nella porzione centrale (67') del corpo di membrana (67), affiancate fra loro
20 ortogonalmente al primo asse (Z), ciascun corpo di membrana di trasduzione (78) estendendosi lungo il primo asse (Z) fra la rispettiva cavità di trasduzione (75) e la prima faccia principale (53A); e

- una rispettiva pluralità di dette strutture
25 piezoelettriche di trasduzione (79) affiancate fra loro

ortogonalmente al primo asse (Z), ciascuna estendendosi sul
rispettivo corpo di membrana di trasduzione (78), sopra la
prima faccia principale (53A), e formando con il rispettivo
corpo di membrana di trasduzione (78) una rispettiva membrana
5 di trasduzione (83) dell'elemento MUT (55), sospesa sulla
rispettiva cavità di trasduzione (75),

in cui ciascun corpo di membrana di trasduzione (78)
presenta lungo il primo asse (Z) il secondo spessore (S_2).

8. Processo di fabbricazione di un dispositivo
10 trasduttore ultrasonico MEMS, MUT, (50), comprendente la
fase di formare almeno un elemento MUT (55) in un corpo
semiconduttore (53) di materiale semiconduttore, il corpo
semiconduttore (53) definendo una struttura di supporto
(53') ed avendo una prima (53A) ed una seconda (53B) faccia
15 principale opposte fra loro lungo un primo asse (Z),

in cui la fase di formare l'almeno un elemento MUT (55)
comprende:

- formare una cavità di modulazione (65) nel corpo
semiconduttore (53), a partire dalla seconda faccia
20 principale (53B) verso la prima faccia principale (53A),
definendo così un corpo di membrana (67) del corpo
semiconduttore (53), che si estende lungo il primo asse (Z)
fra la cavità di modulazione (65) e la prima faccia
principale (53A) e che è fissato alla struttura di supporto
25 (53') in modo da essere sospeso sulla cavità di modulazione

(65), il corpo di membrana (67) comprendendo una porzione centrale (67') e una o più porzioni estremali (67'') che sono interposte, ortogonalmente al primo asse (Z), fra la porzione centrale (67') e la struttura di supporto (53') e che
5 accoppiano reciprocamente la porzione centrale (67') e la struttura di supporto (53'), l'una o più porzioni estremali (67'') definendo un corpo di membrana di modulazione (68);

- formare almeno una cavità di trasduzione (75) nella porzione centrale (67') del corpo di membrana (67), definendo
10 così almeno un corpo di membrana di trasduzione (78) della porzione centrale (67'), il corpo di membrana di trasduzione (78) estendendosi lungo il primo asse (Z) fra la cavità di trasduzione (75) e la prima faccia principale (53A);

- formare, sopra la prima faccia principale (53A), una
15 struttura piezoelettrica di modulazione (69) sul corpo di membrana di modulazione (68) e una struttura piezoelettrica di trasduzione (79) sul corpo di membrana di trasduzione (78), la struttura piezoelettrica di modulazione (69) formando con il corpo di membrana di modulazione (68) una
20 membrana di modulazione (73) dell'elemento MUT (55), sospesa sulla cavità di modulazione (65) e la struttura piezoelettrica di trasduzione (79) formando con il corpo di membrana di trasduzione (78) una membrana di trasduzione (83) dell'elemento MUT (55), sospesa sulla cavità di
25 trasduzione (75),

in cui il corpo di membrana di modulazione (68) presenta lungo il primo asse (Z) un primo spessore (S_1) e il corpo di membrana di trasduzione (78) presenta lungo il primo asse (Z) un secondo spessore (S_2) minore del primo spessore (S_1),

5 in cui la struttura piezoelettrica di modulazione (69) è controllabile elettricamente per mettere in vibrazione la membrana di modulazione (73) ad una prima frequenza di vibrazione e la struttura piezoelettrica di trasduzione (79) è configurata per generare e/o rilevare la vibrazione della
10 membrana di trasduzione (83) ad una seconda frequenza di vibrazione maggiore della prima frequenza di vibrazione, per emettere e/o ricevere, da parte della membrana di trasduzione (83), onde acustiche ad una frequenza (f_0) che dipende dalla prima frequenza di vibrazione e dalla seconda frequenza di
15 vibrazione.

9. Processo di fabbricazione secondo la rivendicazione 8, in cui la fase di formare la cavità di trasduzione (75) comprende:

- formare, in un substrato (100) di materiale
20 semiconduttore, una pluralità di trincee (102) separate reciprocamente da strutture a colonna (103);

- eseguire una crescita epitassiale in ambiente riducente in modo da formare un primo strato superficiale di materiale semiconduttore chiudente superiormente le trincee
25 (102); ed

- effettuare un trattamento termico tale da provocare una migrazione di atomi di materiale semiconduttore delle strutture a colonne (103), formando così la cavità di trasduzione (75) di tipo sepolto e il corpo di membrana di trasduzione (78) chiudente superiormente la cavità di trasduzione (75).

10. Processo di fabbricazione secondo la rivendicazione 9, in cui la fase di formare la struttura piezoelettrica di modulazione (69) e la struttura piezoelettrica di trasduzione (79) è eseguita dopo aver formato la cavità di trasduzione (75), e

in cui la fase di formare la cavità di modulazione (65) è eseguita dopo aver formato la struttura piezoelettrica di modulazione (69) e la struttura piezoelettrica di trasduzione (79) e comprende eseguire un primo attacco ("etch") profondo del silicio a partire dalla seconda faccia principale (53B) del corpo semiconduttore (53).

11. Processo di fabbricazione secondo la rivendicazione 8, in cui la fase di formare la cavità di modulazione (65) è eseguita dopo aver formato la struttura piezoelettrica di modulazione (69) e la struttura piezoelettrica di trasduzione (79) sulla prima faccia principale (53A) del corpo semiconduttore (53) e comprende eseguire un primo attacco ("etch") profondo del silicio a partire dalla seconda faccia principale (53B) del corpo semiconduttore (53), in

corrispondenza di una prima regione del corpo semiconduttore (53) allineata lungo il primo asse (Z) con la struttura piezoelettrica di modulazione (69) e la struttura piezoelettrica di trasduzione (79), la cavità di modulazione (65) essendo delimitata superiormente da una prima superficie di fondo (65A) del corpo semiconduttore (53), e

in cui la fase di formare la cavità di trasduzione (79) è eseguita dopo aver formato la cavità di modulazione (65) e comprende eseguire un secondo attacco ("etch") profondo del silicio a partire dalla prima superficie di fondo (65A) del corpo semiconduttore (53), in corrispondenza di una seconda regione del corpo semiconduttore (53) allineata lungo il primo asse (Z) con la struttura piezoelettrica di trasduzione (79).

12. Metodo di controllo di un dispositivo trasduttore ultrasonico MEMS, MUT, (50), secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1-7,

il metodo di controllo comprendendo le fasi di:

- controllare elettricamente la struttura piezoelettrica di modulazione (69) per mettere in vibrazione la membrana di modulazione (73) alla prima frequenza di vibrazione; e

- in una modalità di emissione del dispositivo MUT (50), controllare elettricamente la struttura piezoelettrica di trasduzione (79) in modo da mettere in vibrazione la membrana

di trasduzione (83) alla seconda frequenza di vibrazione per generare dette onde acustiche oppure, in una modalità di ricezione del dispositivo MUT (50), rilevare, tramite la struttura piezoelettrica di trasduzione (79), la vibrazione
5 della membrana di trasduzione (83) alla seconda frequenza di vibrazione, indotta da dette onde acustiche incidenti sul dispositivo MUT (50).

13. Metodo di controllo secondo la rivendicazione 12, in cui la fase di controllare elettricamente la struttura
10 piezoelettrica di trasduzione (79) nella modalità di emissione del dispositivo MUT (50) e la fase di rilevare la vibrazione della membrana di trasduzione (83) nella modalità di ricezione del dispositivo MUT (50) sono eseguite in uno o più intervalli temporali (T^*) in cui la membrana di
15 modulazione (73) si muove linearmente lungo il primo asse (Z), relativamente ad una sua posizione a riposo.

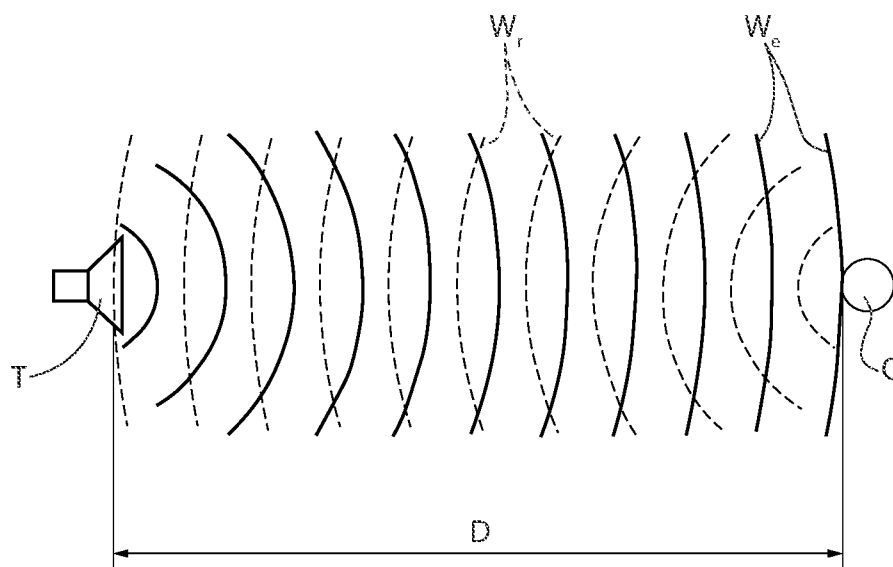


FIG. 1

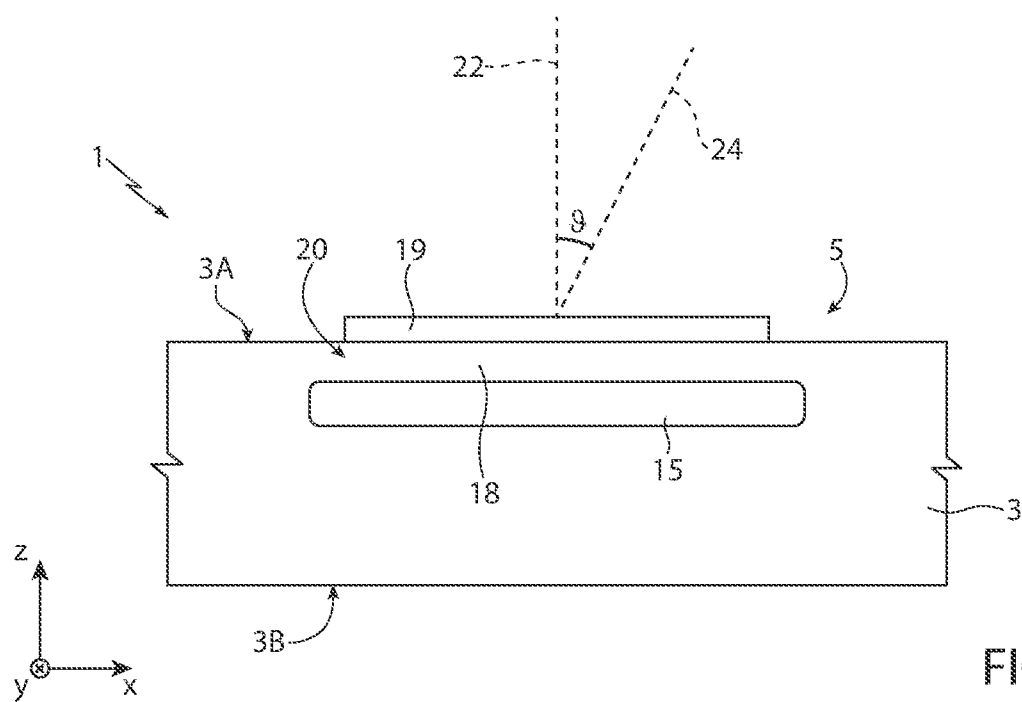


FIG. 2

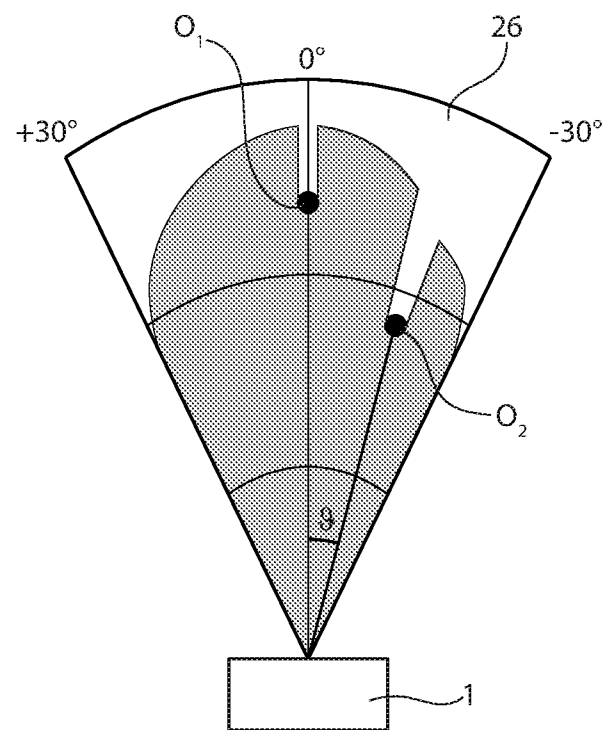


FIG. 3

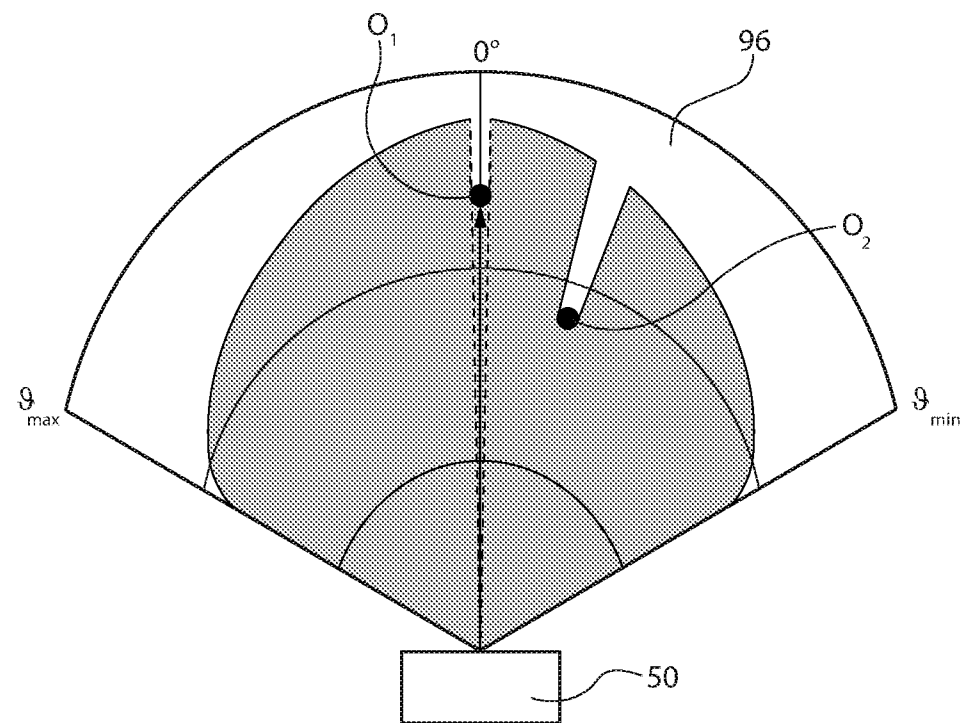


FIG. 15

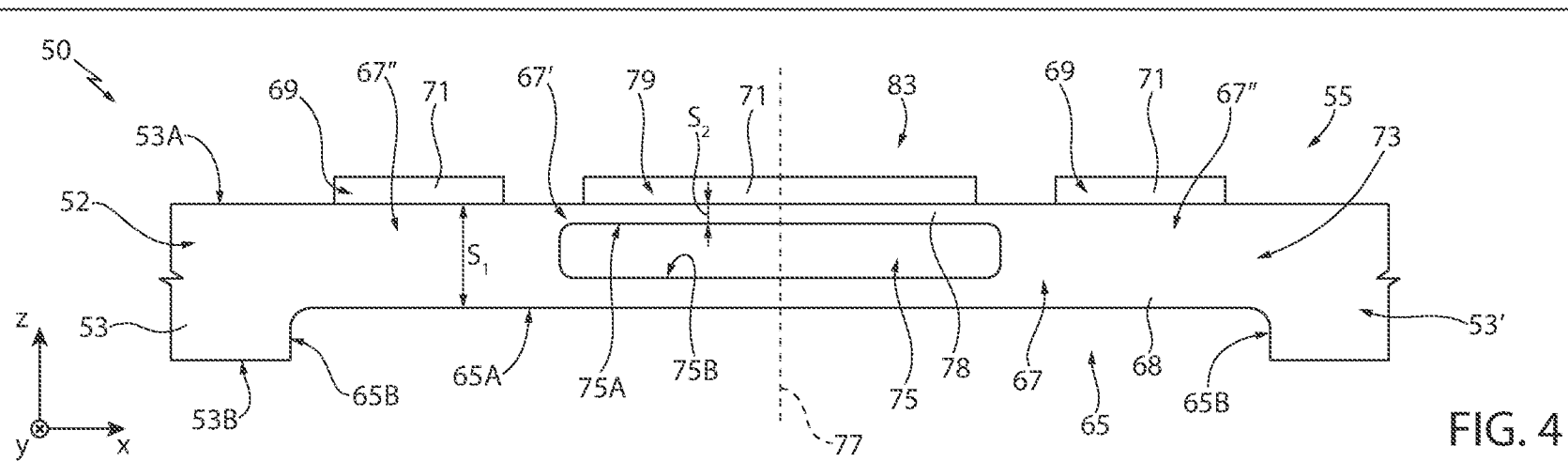


FIG. 4

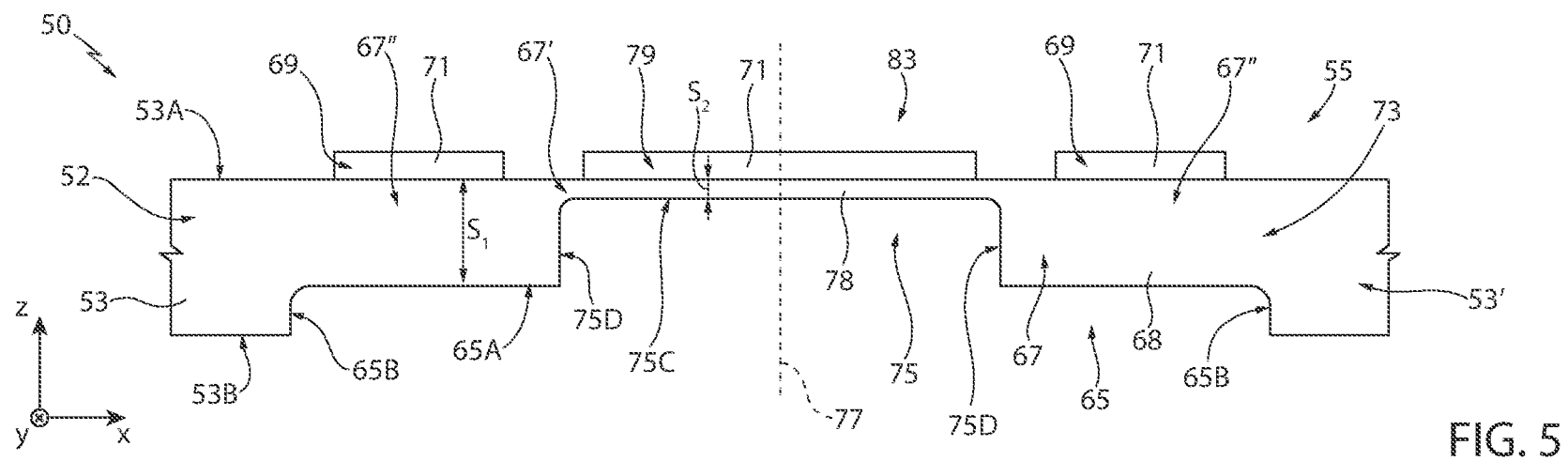
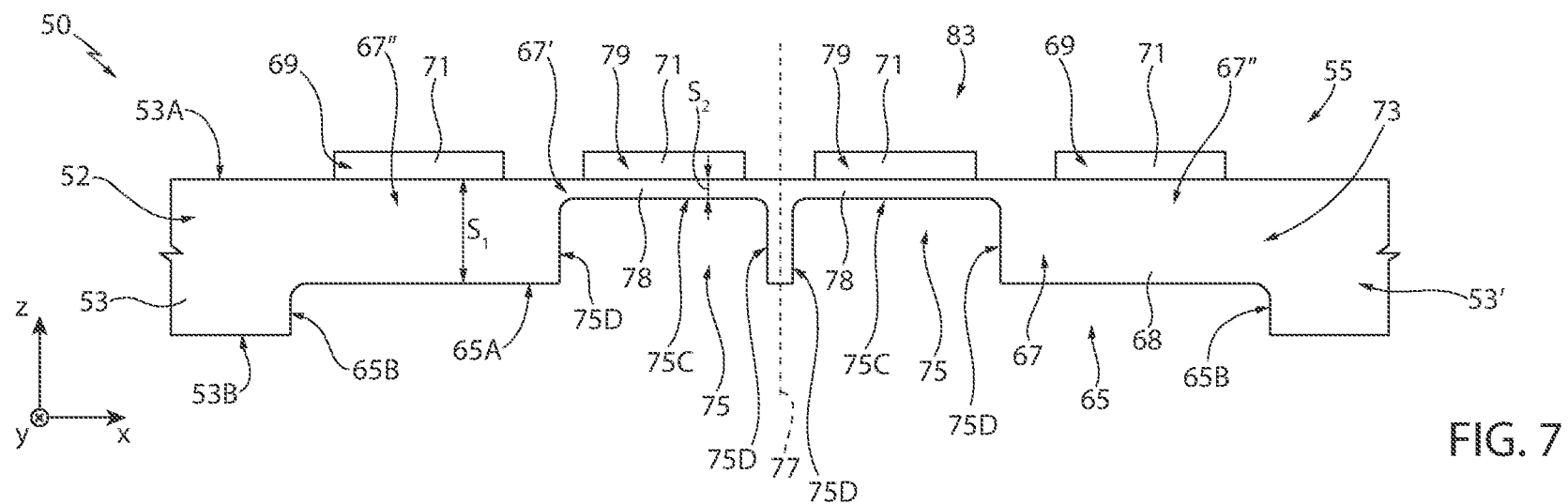
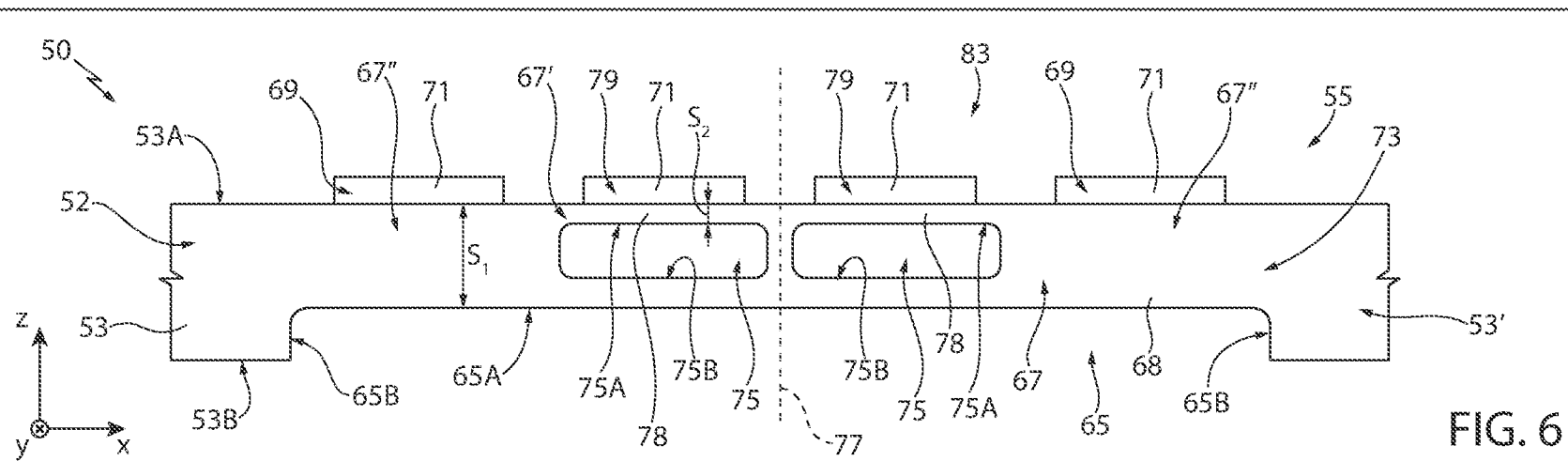
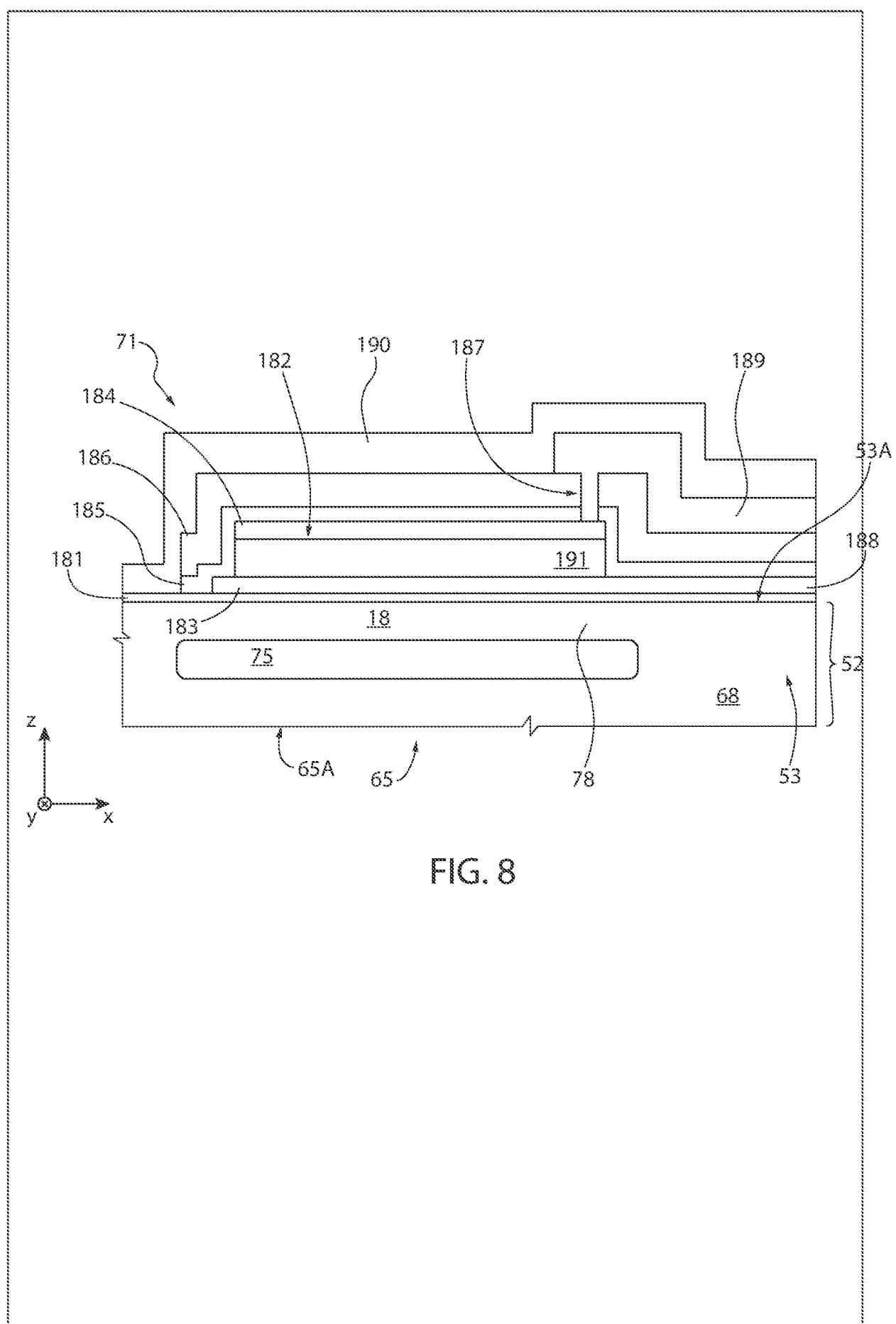
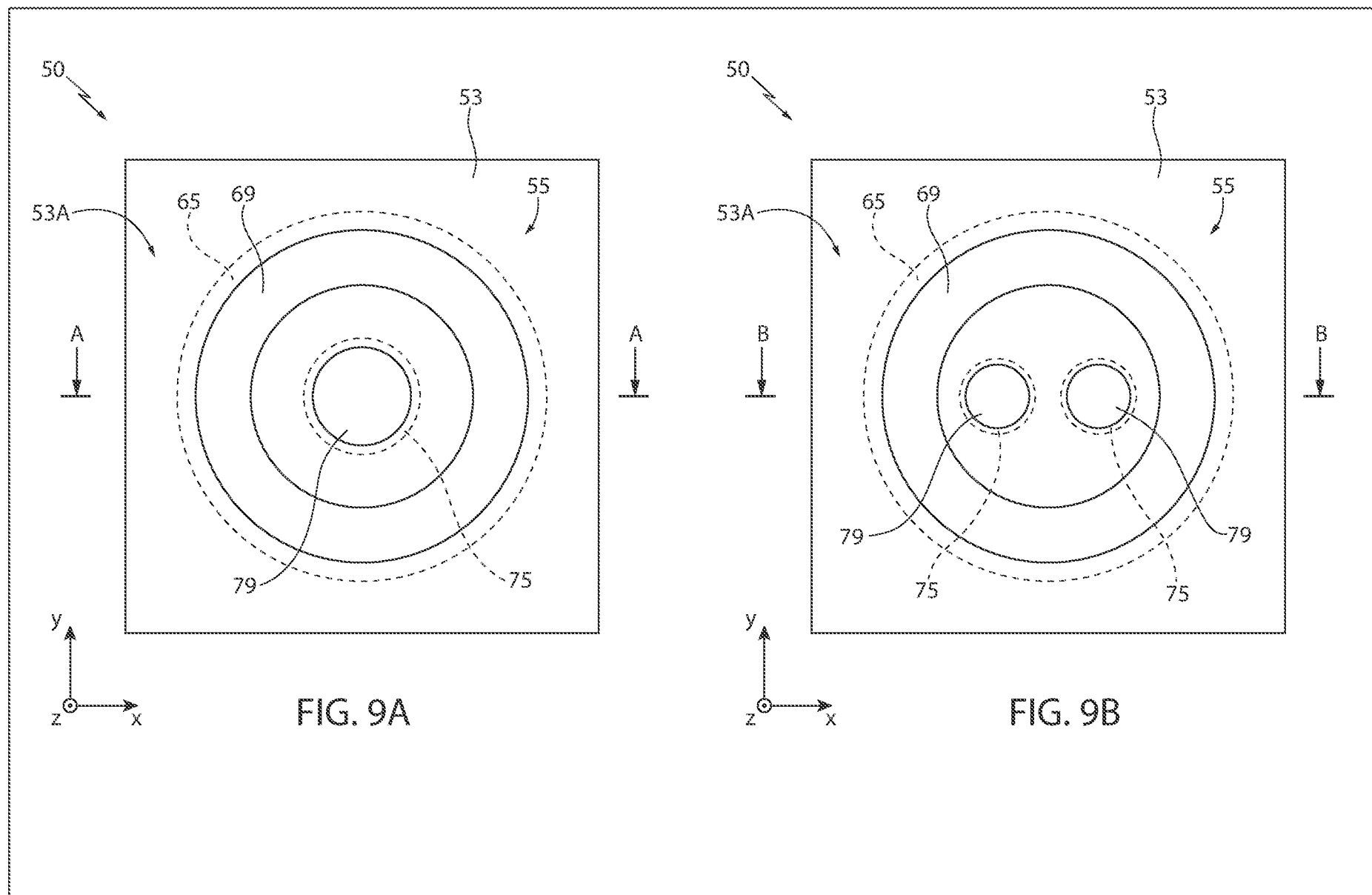
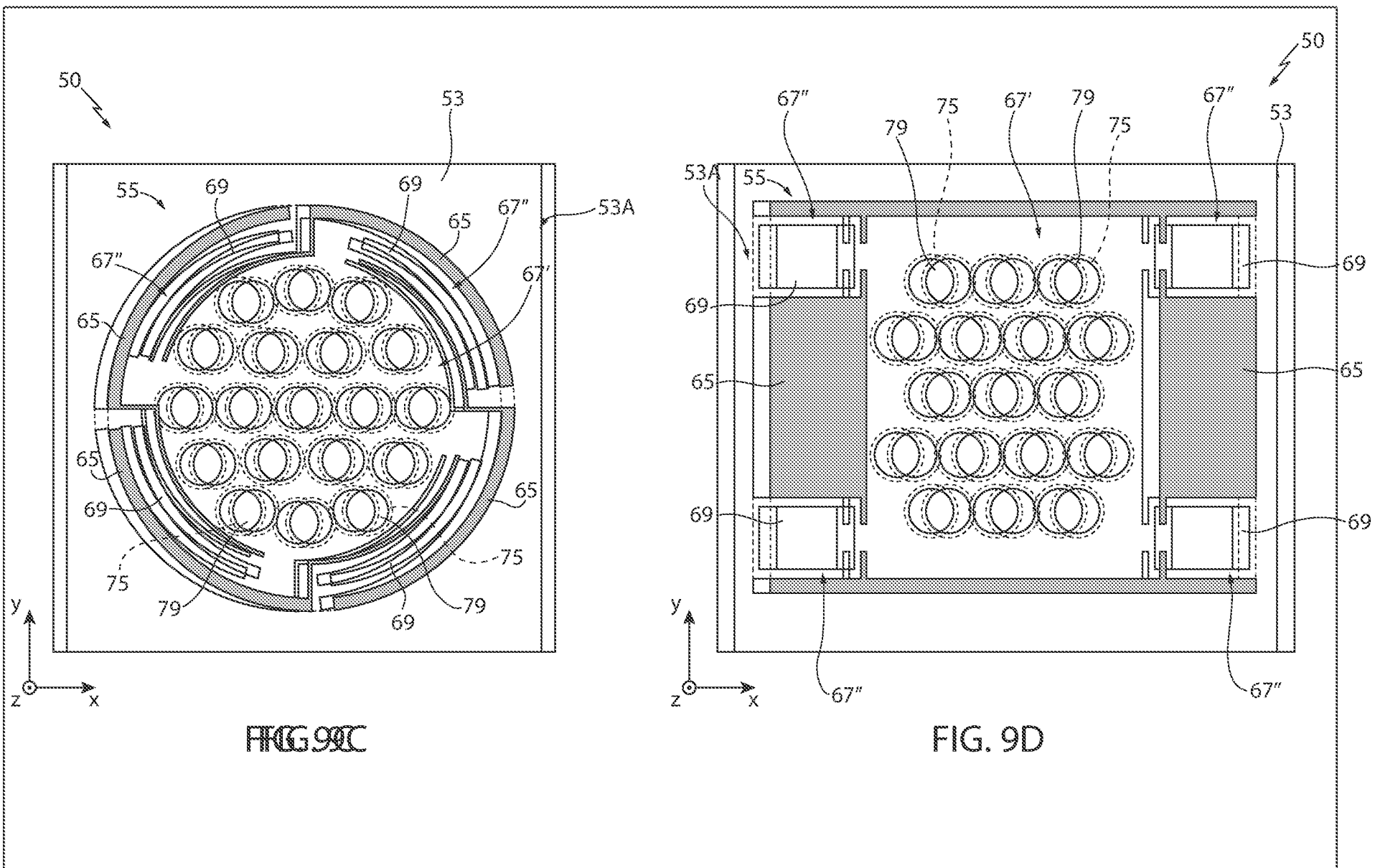


FIG. 5









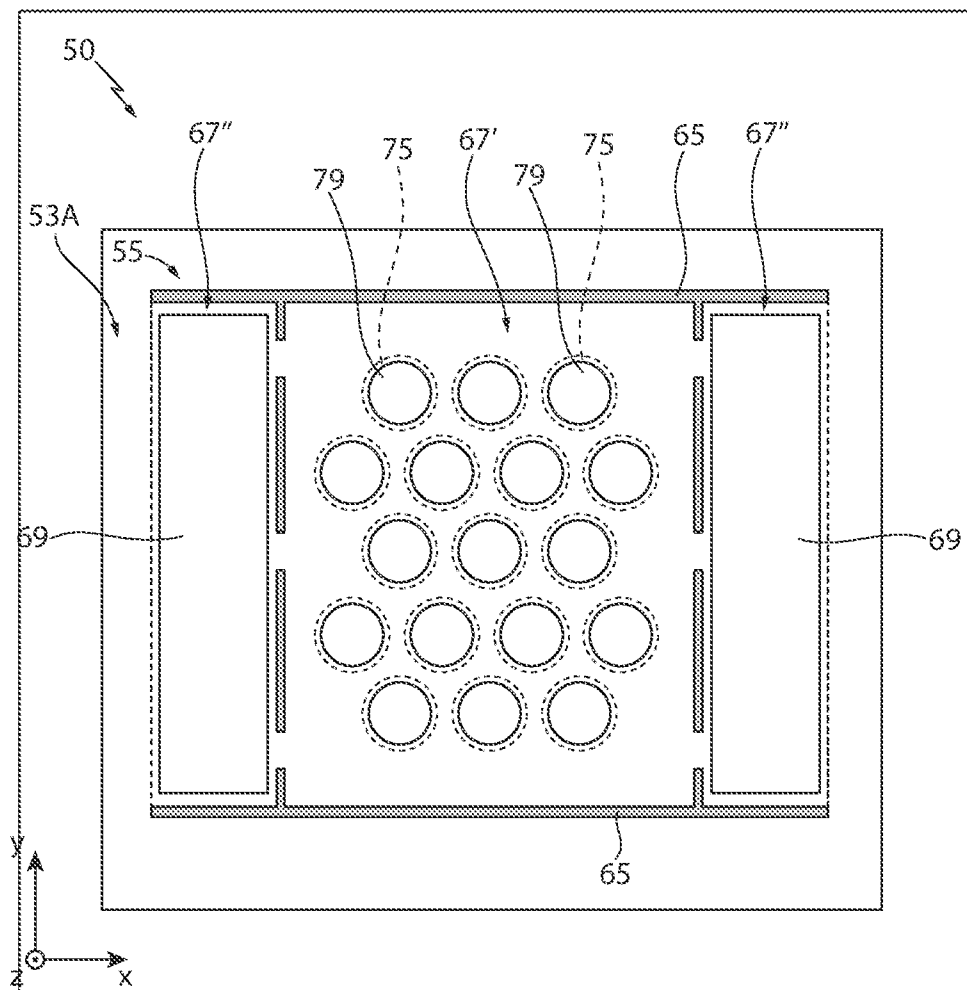


FIG. 9E

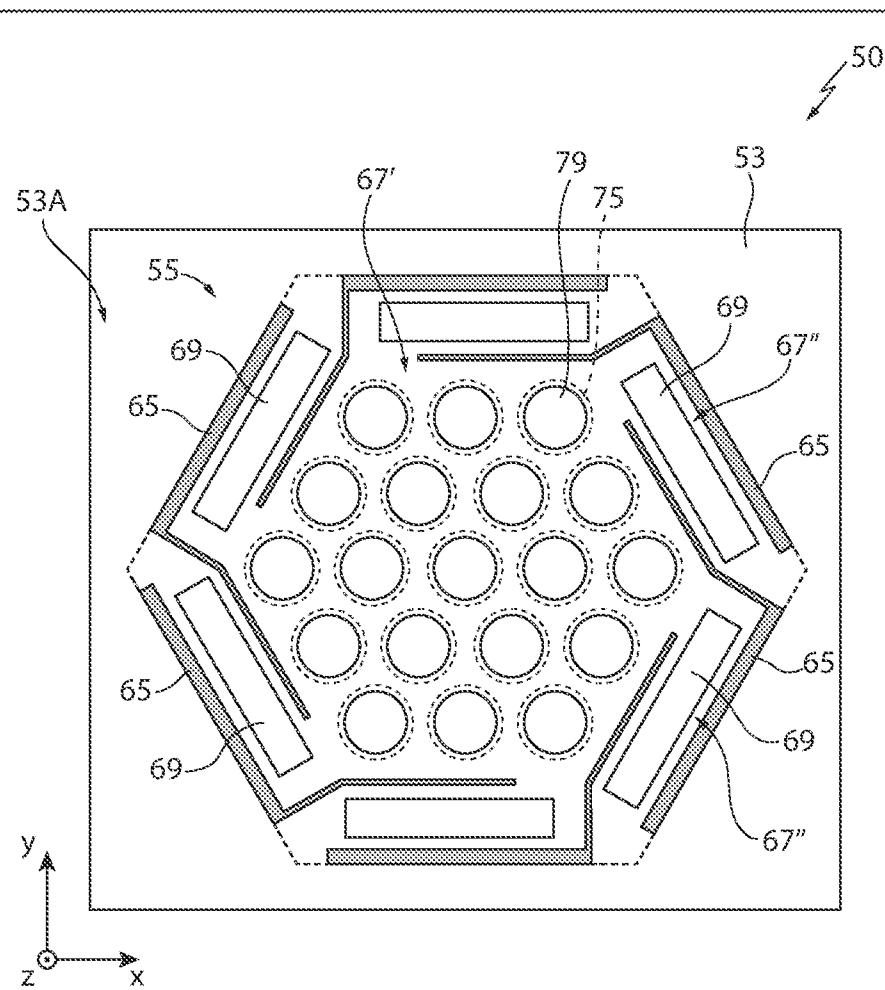


FIG. 9F

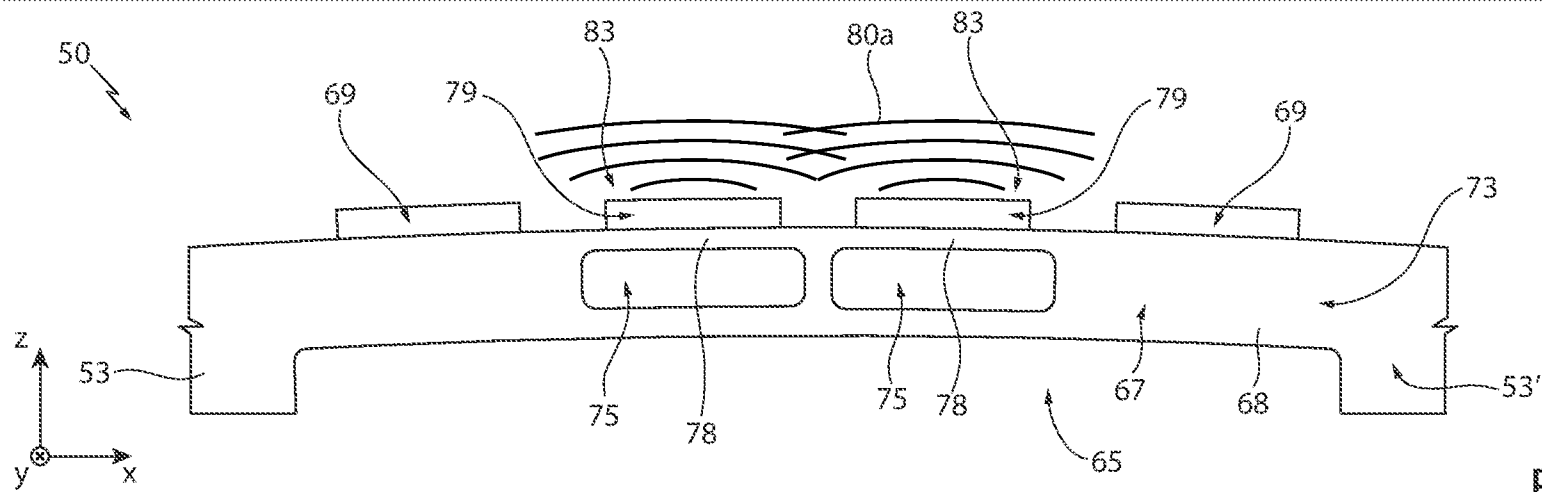


FIG. 10A

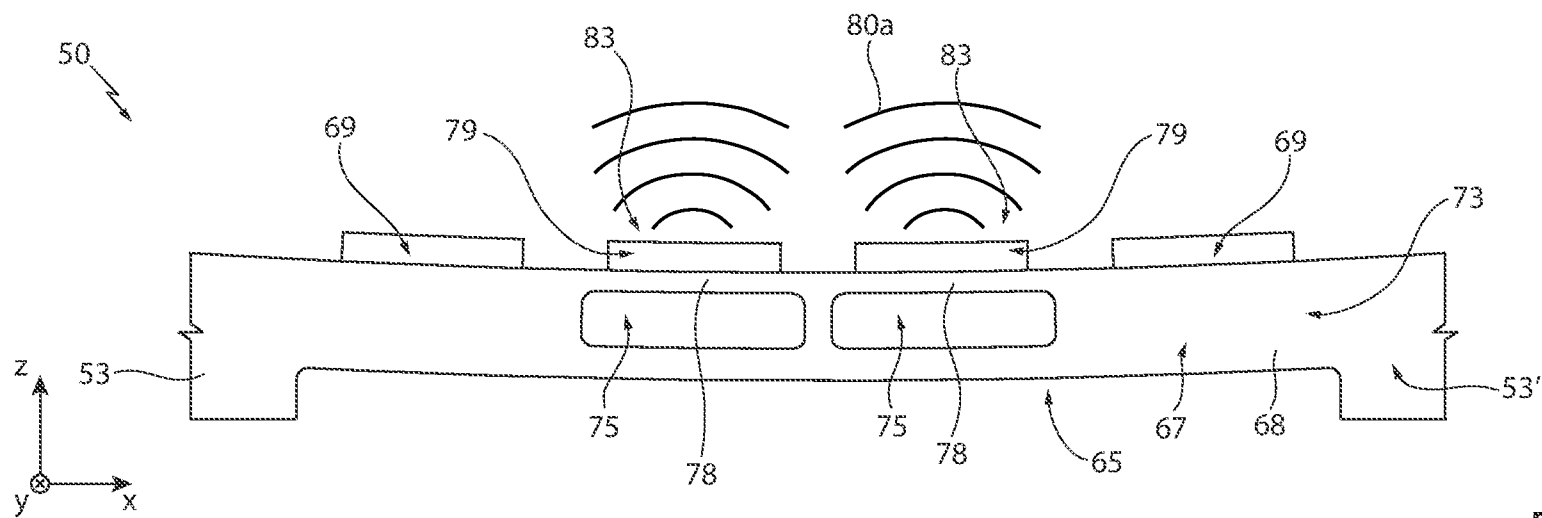


FIG. 10B

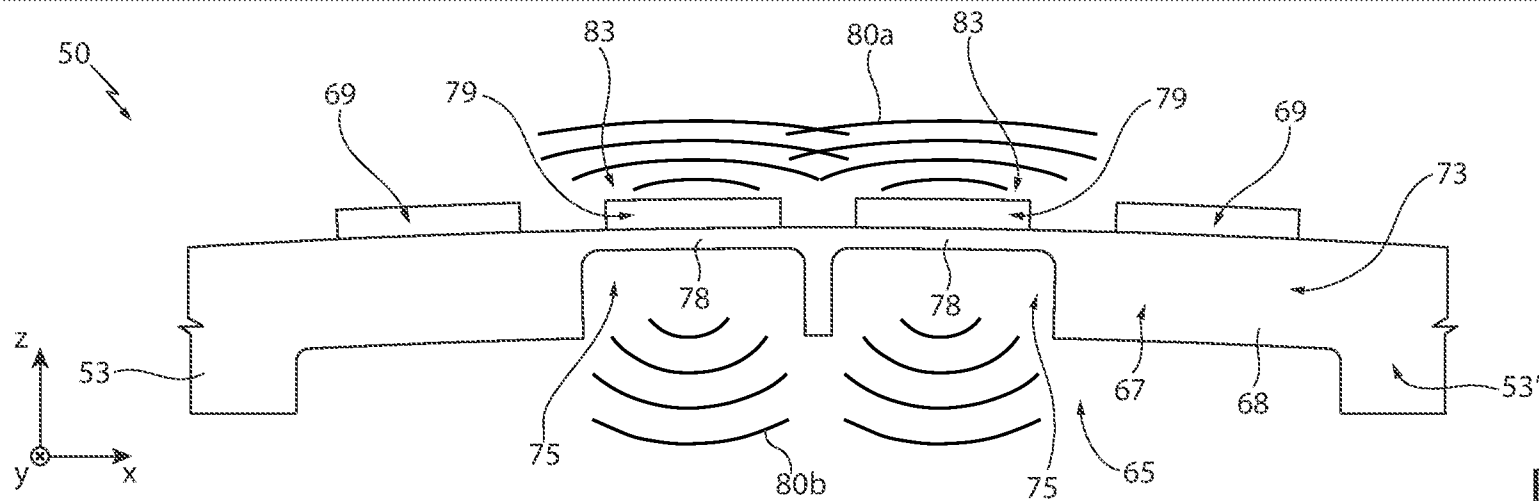


FIG. 11A

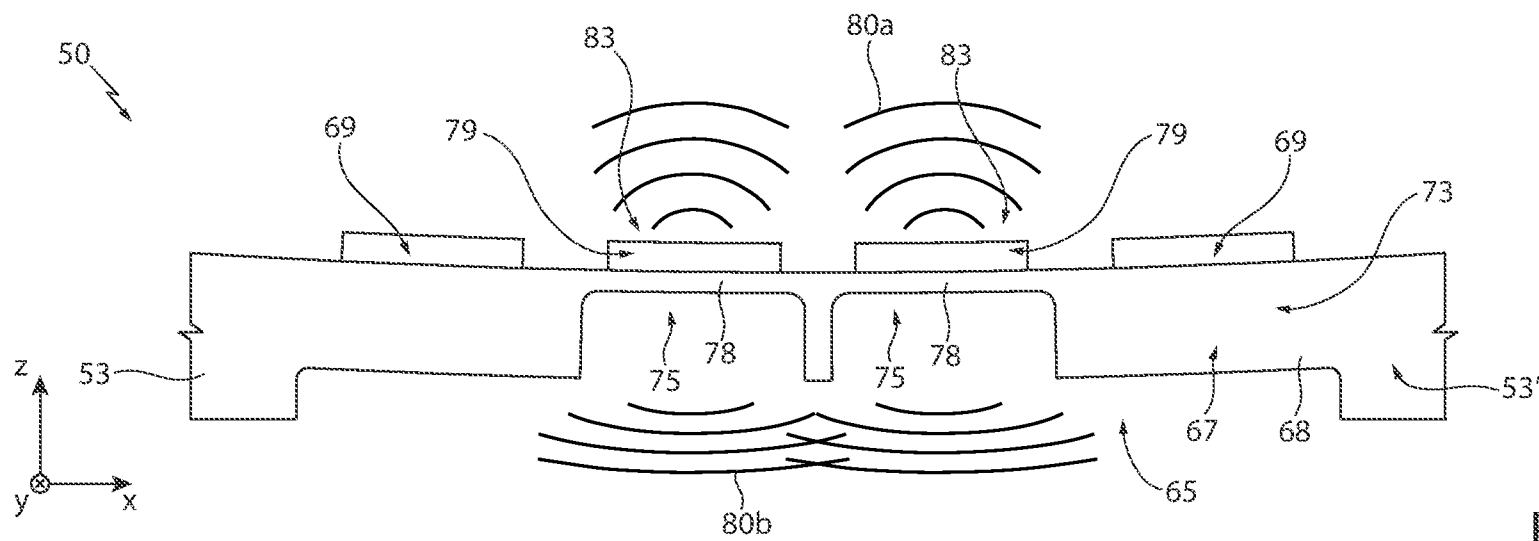


FIG. 11B

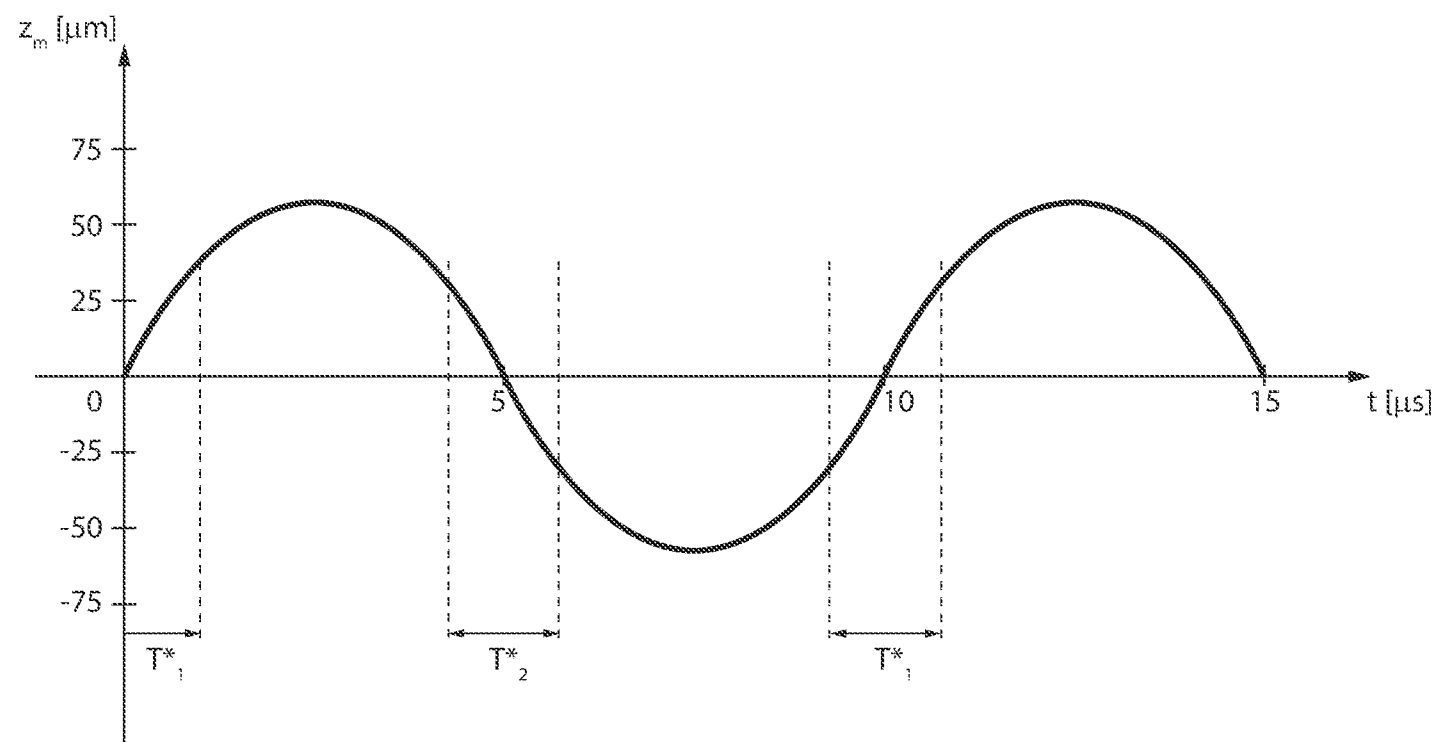


FIG. 12

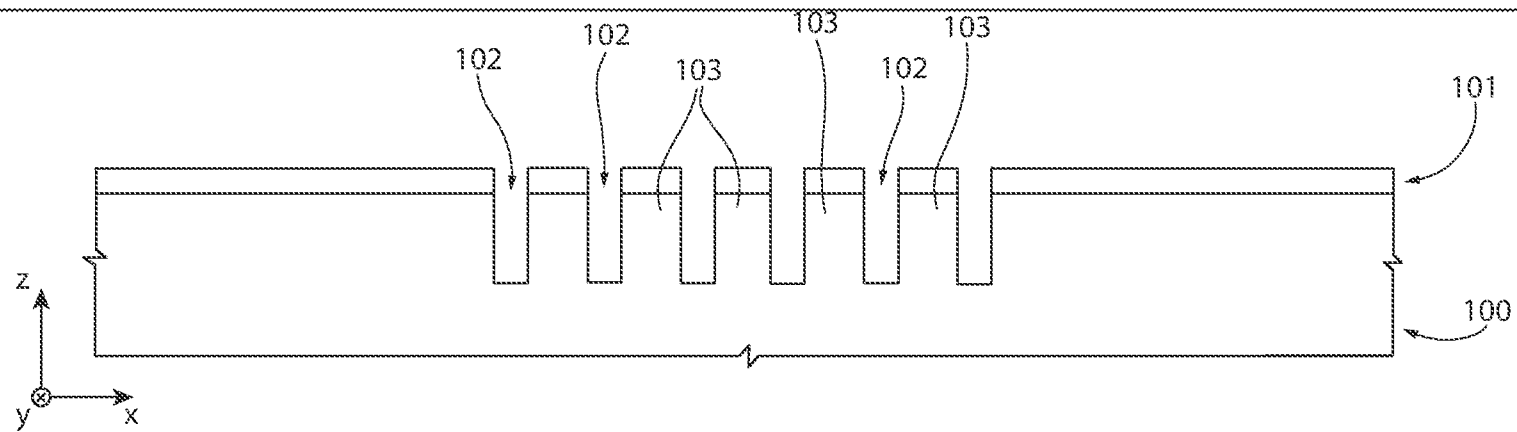


FIG. 13A

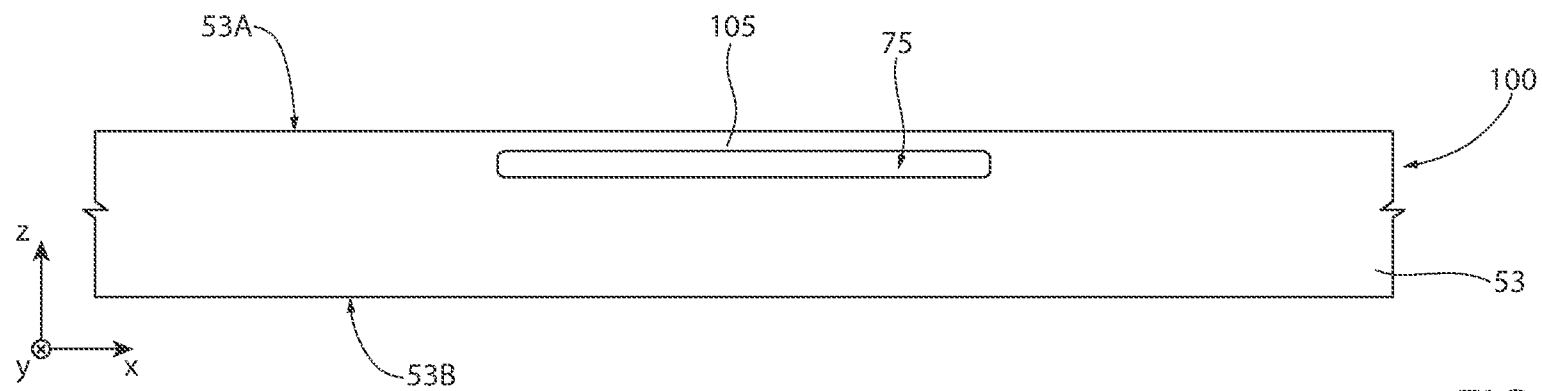


FIG. 13B

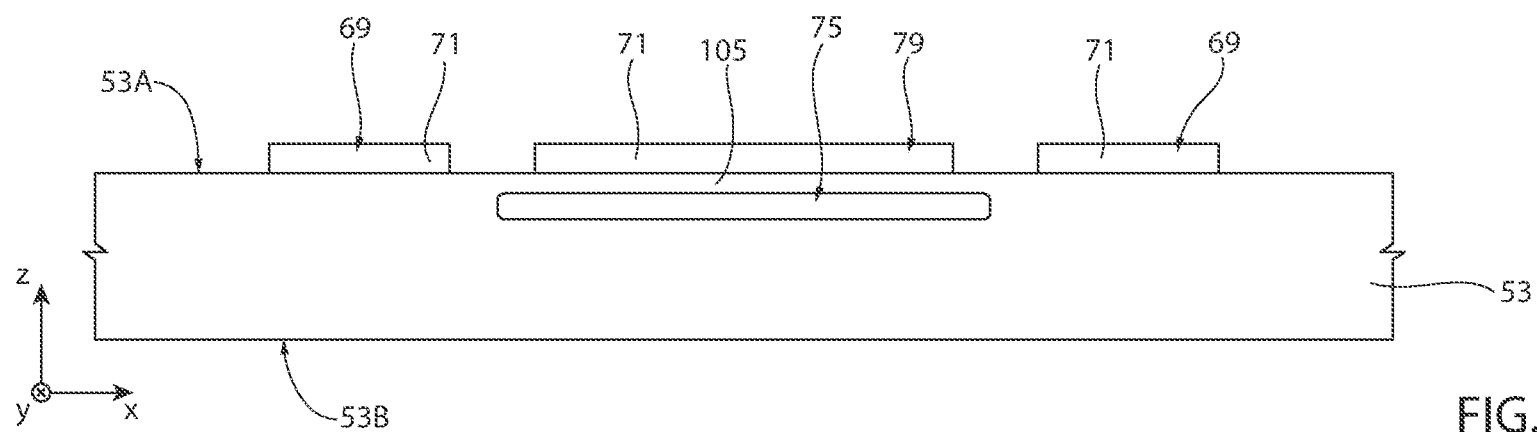


FIG. 13C

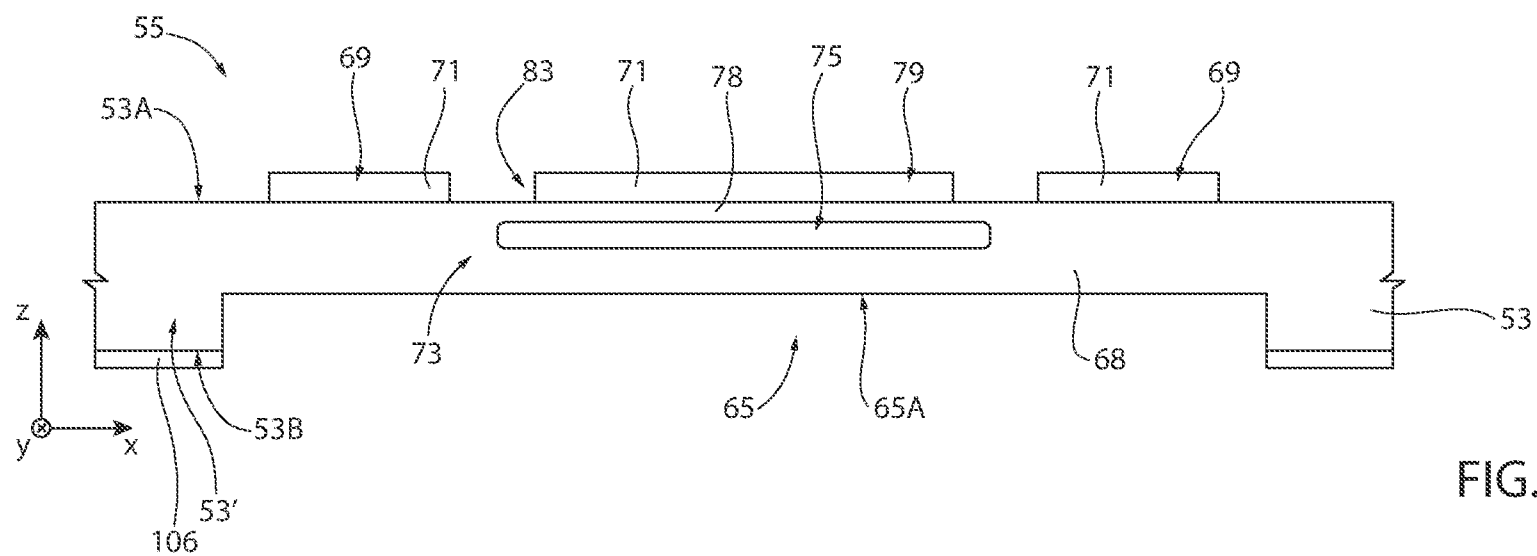


FIG. 13D

