

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102021000029288
Data Deposito	19/11/2021
Data Pubblicazione	19/05/2023

Classifiche IPC

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
B	06	B	1	06

Titolo

DISPOSITIVO TRASDUTTORE ULTRASONICO MEMS CON SMORZAMENTO MIGLIORATO DELLE OSCILLAZIONI DI UNA MEMBRANA DEL MEDESIMO, E PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE DEL MEDESIMO

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"DISPOSITIVO TRASDUTTORE ULTRASONICO MEMS CON SMORZAMENTO
MIGLIORATO DELLE OSCILLAZIONI DI UNA MEMBRANA DEL MEDESIMO,
5 E PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE DEL MEDESIMO"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

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

Inventori: GIUSTI Domenico, FERRERA Marco, TENTORI Lorenzo

10

* * *

La presente invenzione è relativa ad un dispositivo
trasduttore ultrasonico MEMS (MUT) con smorzamento
migliorato delle oscillazioni di una membrana del medesimo,
e ad un procedimento di fabbricazione del medesimo. In
15 particolare, è relativa ad un dispositivo MUT realizzato in
un corpo semiconduttore e comprendente uno o più elementi
MUT, ciascuno dei quali presenta un percorso fluidico di
ricircolo affacciato ad una faccia del corpo semiconduttore
che è opposta all'una o più rispettive membrane vibranti
20 dell'uno o più elementi MUT rispetto al corpo semiconduttore.

Come noto, i sensori di prossimità comprendono sensori
di tempo di volo ("time-of-flight"). In particolare, i
sensori di tempo di volo possono essere trasduttori
ultrasonici, ad esempio realizzati in tecnologia MEMS
25 ("Micro Electro-Mechanical Systems").

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 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 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 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 o capacitiva, è controllabile per oscillare al fine di 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 o capacitiva, l'onda riflessa W_r .

La figura 2 mostra in funzione del tempo uno spostamento (indicato in figura 2 con il riferimento X_m) della membrana del trasduttore ultrasonico T rispetto ad una posizione di riposo della membrana (corrispondente cioè alla posizione che la membrana assume quando non sta oscillando, e quindi quando il trasduttore ultrasonico T non sta né emettendo né rilevando). Come si può notare, il grafico di figura 2 mostra, in successione fra loro, una prima forma d'onda $X_{m,e}$ indicativa dello spostamento della membrana che genera l'emissione dell'onda emessa W_e , e una seconda forma d'onda $X_{m,r}$ indicativa dello spostamento della membrana generato dalla ricezione dell'onda riflessa W_r . La prima forma d'onda $X_{m,e}$ presenta una prima porzione con andamento oscillatorio lungo un intervallo di "ring-up" T_{up} , dove i rispettivi picchi della prima forma d'onda $X_{m,e}$ hanno ampiezza massima crescente in funzione del tempo, e una seconda porzione consecutiva alla prima porzione e con andamento oscillatorio lungo un intervallo di "ring-down" T_{down} , dove i rispettivi picchi della prima forma d'onda $X_{m,e}$ hanno ampiezza massima decrescente in funzione del tempo (es., in modo esponenziale). L'intervallo di ring-up T_{up} corrisponde all'intervallo di tempo necessario per portare la membrana ad oscillare alla frequenza desiderata di emissione dell'onda emessa W_e , mentre l'intervallo di ring-down T_{down} corrisponde all'intervallo di tempo necessario per

interrompere l'oscillazione della membrana (es., l'intervallo di ring-down T_{down} termina quando l'oscillazione della membrana presenta ampiezza massima minore di un'ampiezza massima soglia, ad esempio paragonabile a rumore di misura). La seconda forma d'onda $X_{m,r}$ presenta invece
5 andamento oscillatorio lungo un intervallo di eco T_{eco} , dove i rispettivi picchi della seconda forma d'onda $X_{m,r}$ hanno prima ampiezza massima crescente e poi decrescente in funzione del tempo. Generalmente, fra l'emissione dell'onda
10 emessa W_e e la ricezione dell'onda riflessa W_r (in altre parole, fra la fine dell'intervallo di ring-down T_{down} e l'inizio dell'intervallo di eco T_{eco}) intercorre un intervallo di zona cieca T_{cieca} che, durante il corretto funzionamento del trasduttore ultrasonico T , non è nullo. In
15 dettaglio, la somma dell'intervallo di ring-up T_{up} , dell'intervallo di ring-down T_{down} e dell'intervallo di zona cieca T_{cieca} definisce il tempo di volo T_{TOF} del trasduttore ultrasonico T . Di conseguenza, l'intervallo di zona cieca T_{cieca} è correlato alla distanza relativa D dell'oggetto O
20 rispetto al trasduttore ultrasonico T .

Tuttavia, quando la distanza relativa D è minore di una distanza relativa soglia, l'onda emessa W_e e l'onda riflessa W_r finiscono con il sovrapporsi parzialmente (cioè l'intervallo di zona cieca T_{cieca} è nullo) rendendo difficile
25 discriminare l'onda riflessa W_r dall'onda emessa W_e , e dunque

complicando o rendendo impossibile la misura della distanza relativa D . In altre parole, la distanza relativa soglia (anche nota come regione cieca) è la distanza relativa D minima rilevabile fra l'oggetto O e il trasduttore ultrasonico T , senza che vi sia perdita di informazione dovuta alla sovrapposizione dell'onda emessa W_e e dell'onda riflessa W_r .

I trasduttori ultrasonici T noti sono ottimizzati durante la progettazione per avere un elevato fattore di merito (es., maggiore di 150), così da ridurre le perdite di energia durante il funzionamento. Tuttavia, ad un fattore di merito crescente corrisponde una minore larghezza di banda dello spettro energetico dell'oscillazione della membrana ed un minore smorzamento di questa oscillazione. In altre parole, ad un maggiore fattore di merito corrisponde un maggiore intervallo di ring-down T_{down} , e quindi si riduce l'intervallo di zona cieca T_{cieca} . Poiché l'intervallo di zona cieca T_{cieca} decresce, cresce il rischio di sovrapposizione dell'onda emessa W_e e dell'onda riflessa W_r e dunque il rischio di non poter rilevare la distanza relativa D . Di conseguenza, al crescere del fattore di merito le distanze relative soglia minime rilevabili crescono. Questo è dovuto principalmente al fatto che il trasduttore ultrasonico T opera solitamente immerso in un mezzo di propagazione a bassa densità (es., aria) che non permette uno smorzamento efficace

dell'oscillazione della membrana specialmente alle frequenze di oscillazione di lavoro tipiche della membrana (es., circa 2 MHz), e ha come conseguenza il fatto che i trasduttori ultrasonici T noti non possono rilevare oggetti O troppo
5 prossimi a loro.

Soluzioni note per aumentare lo smorzamento dell'oscillazione della membrana comprendono l'utilizzo di smorzatori passivi (es., strati di opportuno materiale polimerico posti sulla membrana) o attivi (es., fornire alla
10 membrana eccitazioni in contro-fase a seguito degli impulsi attivi che portano la membrana ad oscillare) o di algoritmi per rilevare la variazione di decadimento, causata dall'onda riflessa W_r , dell'involuppo della seconda porzione della prima forma d'onda $X_{m,e}$ al fine di compensarne gli effetti.
15 Tuttavia, queste soluzioni presentano numerose criticità quali l'identificare smorzatori adeguati che permettano, anche al variare delle condizioni ambientali del fluido in cui il trasduttore ultrasonico T è immerso, un accoppiamento corretto fra l'impedenza del trasduttore ultrasonico T e la
20 dissipazione di potenza del fluido, oppure problemi di accoppiamento fra l'impedenza del trasduttore ultrasonico T e la dissipazione di potenza del fluido, oppure una dipendenza eccessiva dalla forma della seconda forma d'onda $X_{m,r}$ e dall'oggetto O da rilevare.

25 Scopo della presente invenzione è fornire un

dispositivo trasduttore ultrasonico MEMS ed un procedimento di fabbricazione del medesimo che superino gli inconvenienti dell'arte nota.

Secondo la presente invenzione viene realizzato un
5 dispositivo trasduttore ultrasonico MEMS ed un procedimento di fabbricazione del medesimo, come definiti nelle rivendicazioni annesse.

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

- la figura 1 mostra schematicamente un trasduttore ultrasonico che genera onde emesse e riceve onde riflesse per rilevare la distanza di un oggetto;
- 15 - la figura 2 è un grafico che mostra, in funzione del tempo, lo spostamento relativamente ad una propria posizione di riposo di una membrana del trasduttore ultrasonico di figura 1, indicativo dell'onda emessa e dell'onda riflessa;
- 20 - la figura 3 è una vista dall'alto di una forma di realizzazione del presente dispositivo trasduttore ultrasonico;
- la figura 4 mostra una sezione trasversale attraverso una porzione del dispositivo trasduttore
25 ultrasonico di figura 3, relativa a una pluralità di elementi

attuatori affiancati;

- la figura 5 mostra una sezione trasversale ingrandita attraverso una porzione del dispositivo trasduttore ultrasonico di figura 3, relativa ad un elemento
5 attuatore singolo;

- le figure 6A e 6B sono viste ingrandite dall'alto e, rispettivamente, dal basso dell'elemento attuatore di figura 5;

- la figura 7 è una sezione trasversale ingrandita
10 di una porzione dell'elemento attuatore di figura 5;

- le figure 8A-8H mostrano sezioni trasversali dell'elemento attuatore di figura 5, in successive fasi di fabbricazione di una forma di realizzazione di un processo di fabbricazione;

15 - le figure 9A-9F mostrano sezioni trasversali dell'elemento attuatore di figura 5, in successive fasi di fabbricazione di una diversa forma di realizzazione di processo di fabbricazione;

- la figura 10 è un grafico che mostra l'andamento
20 di una larghezza di banda del dispositivo trasduttore ultrasonico di figura 3 in funzione di alcune grandezze fisiche del medesimo; e

- la figura 11 è una vista dall'alto di una diversa forma di realizzazione del presente dispositivo trasduttore
25 ultrasonico.

La figura 3 mostra schematicamente un dispositivo trasduttore ultrasonico 1 realizzato in tecnologia MEMS, e quindi anche chiamato nel seguito dispositivo MUT ("Micromachined Ultrasonic Transducer"). Ad esempio il
5 dispositivo MUT 1 è integrato in una piastrina ("die") 2.

Il dispositivo MUT 1 comprende uno o più elementi trasduttori ultrasonici MEMS (o elementi MUT) 5. Nella forma di realizzazione esemplificativamente mostrata in figura 1, il dispositivo MUT 1 comprende una pluralità di elementi MUT
10 5 disposti affiancati reciprocamente, ad esempio allineati su righe e colonne. Nell'esempio di realizzazione di figura 1, gli elementi MUT 5 presentano forma circolare (si veda anche la figura 6).

Ciascun elemento MUT 5 è collegato indipendentemente,
15 tramite connessioni elettriche 6 e piazzole di contatto 7, mostrate schematicamente, ad un'unità di comando 8, generalmente realizzata in una diversa piastrina 9, ad esempio realizzata come ASIC (Application Specific Integrated Circuit). In alternativa, gli elementi MUT 5
20 possono essere collegati a gruppi, in cui gli elementi MUT 5 di un gruppo vengono comandati separatamente e i gruppi sono comandabili separatamente, per ridurre il numero e semplificare le connessioni elettriche.

Con riferimento alla figura 4, la piastrina 2 comprende
25 un corpo semiconduttore 3 di materiale semiconduttore, quale

silicio, ad esempio monolitico, avente una prima ed una seconda faccia principale 3A, 3B e formante la pluralità di elementi MUT 5.

Ciascun elemento MUT 5 comprende un passaggio fluidico
5 centrale 13 e uno o più passaggi fluidici laterali 10. Per
ciascun elemento MUT 5, il passaggio fluidico centrale 10 e
l'uno o più passaggi fluidici laterali 10 sboccano sulla
seconda faccia principale 3B mediante un'apertura centrale
11 e, rispettivamente, una o più aperture laterali 12 (una
10 per ogni passaggio fluidico laterale 10). Opzionalmente, le
aperture laterali 12 possono essere collegate ad un circuito
fluidico esterno non mostrato, ad esempio per consentire
l'aspirazione di un liquido o un gas contenuto in un
serbatoio, o direttamente con l'ambiente esterno, ad esempio
15 per l'aspirazione di aria dall'ambiente; analogamente, le
aperture centrali 11 possono essere collegate ad un circuito
fluidico esterno non mostrato o con l'esterno, a seconda
dell'applicazione prevista.

Come mostrato in dettaglio in figura 5, ciascun elemento
20 MUT 5 comprende inoltre una prima camera 15, disposta in
prossimità della prima faccia principale 3A del corpo
semiconduttore 3, e una seconda camera 20, estendentesi fra
la prima camera 15 e la seconda faccia principale 3B del
corpo semiconduttore 3.

25 Ciascun elemento MUT 5 comprende inoltre trincee

lateralì 21 (una per ciascuna apertura laterale 12) estendentisi fra le aperture laterali 12 e la seconda camera 20, e una trincea centrale 22 estendentesi fra la prima camera 15 e l'apertura centrale 11, attraverso la seconda camera 20. Nel caso in cui ciascun elemento MUT 5 comprende una sola trincea laterale 21, la trincea centrale 22 e la trincea laterale 21 sono affiancate, a distanza, fra loro; diversamente, nel caso in cui ciascun elemento MUT 5 comprende due o più trincee laterali 21, la trincea centrale 22 è interposta fra le trincee laterali 21 (in particolare, è centrale rispetto a queste ultime che sono disposte, in vista dal basso, attorno alla trincea centrale 22, cioè sono radialmente esterne rispetto alla trincea centrale 22).

Ciascuna trincea laterale 21 definisce un rispettivo passaggio fluidico laterale 10, e la trincea centrale 22 definisce il passaggio fluidico centrale 13.

Le trincee laterali 21, la trincea centrale 22 e la seconda camera 20 definiscono un percorso fluidico di ricircolo (non mostrato) che collega fluidicamente la prima camera 15 con l'esterno del dispositivo MUT 1. Il percorso fluidico di ricircolo è configurato per permettere il ricircolo del fluido o gas presente nella prima camera 15, come meglio descritto nel seguito.

La porzione del corpo semiconduttore 3 fra ciascuna prima camera 15 e la prima faccia principale 3A della

piastrina 2 costituisce una rispettiva membrana 18 e su ciascuna membrana 18, al di sopra della prima faccia principale 3A, è disposto un rispettivo elemento piezoelettrico 19.

5 La prima e la seconda camera 15, 20 (qui esemplificativamente con forma circolare) hanno centri allineati fra loro lungo un asse centrale 25. La membrana 18 è quindi concentrica alle camere 15, 20 e, nell'esempio considerato, ha anch'essa forma circolare. Secondo la forma
10 di realizzazione mostrata nelle figure 6A e 6B, la prima camera 15 ha area (in vista dall'alto in figura 6A, o in vista dal basso in figura 6B) maggiore rispetto alla seconda camera 20, in modo che una sua zona periferica, qui di forma ad anello circolare, sporge lateralmente rispetto alla
15 seconda camera 20. Ciononostante e in modo non mostrato, la prima camera 15 può anche avere area minore o uguale rispetto alla seconda camera 20.

Le trincee laterali 21 si estendono verticalmente (perpendicolarmente alla prima e seconda faccia principale
20 3A, 3B del corpo semiconduttore 3) fra le aperture laterali 12 e la seconda camera 20. Nell'esempio di realizzazione mostrato nella figura 6B, le aperture laterali 12 sono quattro per ogni elemento MUT 5 e hanno forma arcuata, a settore di corona circolare, allineate circonferenzialmente
25 fra loro. Le trincee laterali 21 hanno qui uguale forma e

area delle aperture laterali 12 e hanno diametro interno minore rispetto alla seconda camera 20 in modo che quest'ultima le circonda a distanza.

La trincea centrale 22 di ciascun elemento MUT 5 ha qui
5 forma cilindrica parallela e concentrica all'asse centrale
25 del rispettivo elemento MUT 5, ha uguale area (in vista dal basso) alla rispettiva apertura centrale 11, e attraversa la seconda camera 20 per arrivare alla prima camera 15.

L'elemento piezoelettrico 19 può avere la struttura
10 mostrata nella sezione di figura 7.

In dettaglio, l'elemento piezoelettrico 19 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, come discusso in
15 dettaglio in seguito con riferimento alle figure 8A-8H, e copre l'intera prima faccia principale 3A del corpo semiconduttore 3. Al di sopra dello strato isolante 181, si estende una pila 182 comprendente: un elettrodo inferiore 183, di materiale elettricamente conduttore, ad esempio di
20 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
25 note). Un primo ed un secondo strato di dielettrico 185,

186, ad esempio di ossido di silicio e nitruro di silicio
deposto per CVD (Chemical Vapour Deposition) si estendono
sulla pila 182. Una seconda linea di contatto 189 di
materiale conduttore, ad esempio di alluminio e/o rame, si
5 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 ossido di silicio e/o nitruro
deposto per CVD, copre tutta la superficie superiore della
10 piastrina 2, ad eccezione delle aperture di connessione
elettrica (al di sopra delle piazzole di contatto 7). In
pratica, le linee di contatto 188, 189 formano le connessioni
elettriche 6 di figura 3 e consentono: al fine di generare
l'onda emessa W_e da parte dell'elemento MUT 5, la connessione
15 elettrica di uno degli elettrodi 183, 184 (ad esempio
l'elettrodo inferiore 183 di tutti gli elementi attuatori 5)
ad un potenziale di riferimento, tipicamente a massa, e la
polarizzazione dell'altro degli elettrodi 183, 184 (ad
esempio dell'elettrodo superiore 184) ad una tensione di
20 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 18.

Il dispositivo MUT 1 opera in modo analogo ai
25 dispositivi noti (es., al trasduttore ultrasonico T di figura

1). In particolare, 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 dettaglio, onde ultrasoniche) generate o rilevate dal
5 dispositivo MUT 1.

Quando gli elementi MUT 5 sono operati in proprie modalità di trasmissione (cioè lavorano come attuatori), le membrane 18 vengono poste in vibrazione per mezzo degli elementi piezoelettrici 19 e le vibrazioni delle membrane 18
10 causano la generazione e la propagazione nel mezzo di propagazione delle onde acustiche. In particolare, la tensione di attuazione alternata (es., a frequenza compresa fra circa 20 kHz e circa 100 MHz e con voltaggio pari a circa 40 V) viene applicata fra gli elettrodi 183 e 184.
15 L'applicazione della tensione di attuazione alternata fra gli elettrodi 183 e 184 causa la contrazione e l'espansione della regione piezoelettrica a film sottile 191 e la conseguente deflessione della membrana 18 in direzione verticale, alternativamente in allontanamento e in
20 avvicinamento alle camere 15 e 20, provocando corrispondenti aumenti e diminuzioni del volume delle camere 15 e 20. Tali variazioni di volume fanno sì che il mezzo di propagazione (nel seguito, aria) presente nella prima camera 15 venga mosso pneumaticamente e subisca ricircolo rispetto
25 all'ambiente esterno al dispositivo MUT 1. Infatti, tali

variazioni di volume permettono, in successione alternata fra loro, fasi di svuotamento e riempimento parziale della prima camera 15. Ciascuna fase di svuotamento parziale della prima camera 15 comprende l'aspirazione, verso la seconda camera 20 e attraverso la trincea centrale 22, dell'aria presente nella prima camera 15 e successivamente la sua espulsione nell'ambiente esterno attraverso la trincea centrale 22 e le trincee laterali 21. Ciascuna fase di riempimento parziale della prima camera 15 comprende invece l'aspirazione, attraverso la trincea centrale 22 e le trincee laterali 21 e verso la seconda camera 20, dell'aria presente nell'ambiente esterno e successivamente la sua immissione nella prima camera 15 attraverso la trincea centrale 22.

Quando gli elementi MUT 5 sono operati in proprie modalità di ricezione (cioè lavorano come sensori), le onde acustiche provenienti dal mezzo di propagazione (cioè le onde riflesse W_r) incidono sulle membrane 18 e ne inducono la vibrazione. Tale vibrazione indotta di ciascuna membrana 18 causa sia il ricircolo dell'aria nella prima cavità 15, analogamente a quanto precedentemente descritto, che uno stress nell'elemento piezoelettrico 19 che genera a sua volta la differenza di potenziale di rilevamento fra gli elettrodi 183 e 184, indicativa della vibrazione della membrana 18 indotta dalle onde acustiche incidenti.

La modalità di ricezione e la modalità di trasmissione

sono alternative fra loro: il dispositivo MUT 1 può funzionare dunque solo in ricezione, solo in trasmissione, oppure sia in ricezione che in trasmissione, ma in periodi di tempo alternati fra loro.

5 Il dispositivo MUT 1 può essere realizzato, secondo una forma di realizzazione, come descritto qui di seguito con riferimento alle figure 8A-8H, mostranti esemplificativamente la realizzazione di un singolo elemento MUT 5 (gli altri elementi MUT 5 del dispositivo MUT 1 vengono
10 realizzati contemporaneamente, affiancati lateralmente, in modo non mostrato).

 Inizialmente, figura 8A, in una fetta 100 di materiale semiconduttore, ad esempio silicio monocristallino, viene realizzata la seconda camera 20 di ciascun elemento MUT 5.
15 Ad esempio, allo scopo può essere utilizzato il processo di fabbricazione descritto nel brevetto europeo EP1577656 (corrispondente al brevetto US8173513) e riassunto brevemente sotto.

 In dettaglio, al di sopra della fetta 100, viene
20 realizzata una maschera 101 di resist presentante aperture a reticolo a nido d'ape. Usando la 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 15 μm , comunicanti tra loro e delimitanti una
25 pluralità di colonne 103 di silicio.

Successivamente, figura 8B, la 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 30 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 nei brevetti sopra citati, 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 formano le seconde camere 20. Al di sopra delle seconde camere 20 rimane uno strato di silicio, costituito 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.

In seguito, figura 8C, viene eseguita un'altra crescita epitassiale, di spessore di qualche decina di micrometri, ad esempio pari a 50 μm , a partire dallo strato di chiusura 105. In questo modo la fetta 100 comprende una prima regione spessa 108 di silicio monocristallino che sovrasta le seconde

camere 20.

Successivamente, figura 8D, nella prima regione spessa
108 vengono realizzate le prime camere 15, ad esempio
ripetendo il processo di fabbricazione descritto nel
5 brevetto europeo EP1577656 e descritto in precedenza con
riferimento alle figure 8A e 8B). In questo modo, la fetta
100 ha una prima ed una seconda faccia corrispondenti alla
prima e seconda faccia principale 3A, 3B del corpo
semiconduttore 3 e alloggia, al di sopra delle seconde camere
10 20, le prime camere 15 e le membrane 18.

In seguito, figura 8E, utilizzando uno strato di
mascheratura non mostrato, vengono realizzati fori 115, uno
per ogni prima camera 15, che si estendono ciascuno dalla
prima faccia 3A della fetta 100 fino alla rispettiva prima
15 camera 15. I fori 115, del diametro di, ad esempio, 2 μm ,
vengono realizzati preferibilmente in prossimità di un bordo
esterno delle rispettive membrane 18, in modo da non
alterarne le caratteristiche elastiche di queste.

Quindi, figura 8F, viene eseguita una ossidazione
20 termica, formando uno strato di ossido con spessore, ad
esempio, di 1 μm . In particolare, si formano una porzione di
ossido di rivestimento 116A sui lati di ciascuna delle prime
camere 15, una prima ed una seconda porzione di ossido
superficiale 116B e 116C sulle facce 3A e, rispettivamente,
25 3B della fetta 100 e una porzione di ossido di chiusura 116D

all'interno di ciascuno dei fori 115. Le prime camere 15 sono quindi completamente coperte dalle porzioni di ossido di rivestimento 116A e i fori 115 vengono chiusi dalle porzioni di ossido di chiusura 116D.

5 Successivamente, figura 8G, sulla prima porzione di ossido superficiale 116B viene depositato uno strato di materiale dielettrico 117, ad esempio di TEOS (tetraetilortosilicato), che, insieme alla prima porzione superficiale 116B, forma lo strato isolante 181 di figura 7.
10 Lo strato di materiale dielettrico 117 può avere, ad esempio, spessore di 1 μm .

Quindi, sullo strato di materiale dielettrico 117 vengono realizzati gli elementi piezoelettrici 19. Ad esempio, con riferimento alla figura 7, vengono realizzati
15 dapprima gli elettrodi 183 e le prime 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
20 mediante tecniche di mascheratura e 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 186, 186 vengono depositati e definiti, formando le aperture 187; vengono realizzate le seconde linee
25 di contatto 189 e viene depositato e definito lo strato di

passivazione 190, che viene così aperto sulle piazzole di contatto (non mostrate).

In seguito, figura 8H, viene eseguito un primo attacco ("etch") profondo del silicio dal retro, attraverso la
5 seconda porzione di ossido superficiale 116C, fino a raggiungere la seconda camera 20, realizzando le trincee laterali 22 e le aperture laterali 11. Inoltre, questo attacco realizza anche parte della trincea centrale 22 (fino a raggiungere la seconda camera 20) e l'apertura centrale
10 12. In questa fase, le porzioni di ossido di rivestimento 116A operano come arresto all'attacco ("etch stop").

Inoltre, in figura 8H, viene eseguito un secondo attacco ("etch") profondo del silicio dal retro, attraverso l'apertura centrale 22 fino a raggiungere la prima camera 15
15 (cioè attraverso la porzione di ossido di rivestimento 116A), terminando la realizzazione della trincea centrale 22 e mettendola in comunicazione di fluido con la prima camera 15.

Dopo l'effettuazione delle fasi finali di
20 fabbricazione, includenti l'apertura dei contatti e il taglio della fetta 100, si ottiene il dispositivo MUT 1 delle figure 3-6B.

Secondo un'altra forma di realizzazione mostrata nelle figure 9A-9F, il dispositivo MUT 1 viene realizzato tramite
25 l'utilizzo di silicio poroso e regioni sacrificali.

In dettaglio, con riferimento alla figura 9A, una fetta 200 comprende un substrato 201 di materiale semiconduttore, qui silicio, ad esempio monocristallino, e una prima regione sacrificale 204, cresciuta termicamente o deposta sul substrato 201 (es., su una prima faccia 201A del substrato 201). La prima regione sacrificale 204 è destinata a formare la seconda cavità 20 e può essere, ad esempio, di ossido di silicio, BPSG (Boron Phosphorous Silicon Glass) o nitruro di silicio.

In figura 9B, un primo strato strutturale 210 di silicio poroso viene depositato sulla prima faccia 201A del substrato 201 e copre la prima regione sacrificale 204. Ad esempio, il primo strato strutturale 210 può essere depositato mediante un processo LPCVD ("Low Pressure Chemical Vapour Deposition") da puro gas silano, ad una pressione di 550 mtorr a 600°C. Il primo strato strutturale 210 può avere ad esempio spessore compreso fra 100 e 150 nm.

In modo noto al tecnico del ramo, il silicio poroso del primo strato strutturale 210 è identificato dalla presenza di micropori che lo rendono permeabile ai liquidi, in particolare ad agenti di attacco, quale HF (acido fluoridrico).

Inoltre, con riferimento alla figura 9B, viene formata nel primo strato strutturale 210 una seconda regione sacrificale 204, ad esempio tramite crescita termica. La

seconda regione sacrificale 205 è a contatto con la prima regione sacrificale 204, è destinata a formare la porzione della trincea centrale 22 compresa fra la prima e la seconda cavità 15, 20 e può essere, ad esempio, di ossido di silicio, BPSG (Boron Phosphorous Silicon Glass) o nitruro di silicio.

Quindi, figura 9C, un secondo strato strutturale 211 di silicio poroso viene depositato sul primo strato strutturale 210 e sulla seconda regione sacrificale 205. Inoltre, viene formata nel secondo strato strutturale 211 una terza regione sacrificale 204, ad esempio tramite crescita termica. La terza regione sacrificale 206 è a contatto con la seconda regione sacrificale 205, si estende sopra quest'ultima e sopra la seconda regione sacrificale 204, è destinata a formare la prima cavità 15 e può essere, ad esempio, di ossido di silicio, BPSG o nitruro di silicio. La prima, la seconda e la terza regione sacrificale 204, 205, 206 formano assieme una regione sacrificale 207 di ossido di silicio, BPSG o nitruro di silicio.

In figura 9D, un terzo strato strutturale 212 di silicio poroso viene depositato sul secondo strato strutturale 211 e sulla terza regione sacrificale 206. La parte del terzo strato strutturale 212 sovrapposta alla terza regione sacrificale 206 è destinata a formare la membrana 18. Il primo, il secondo e il terzo strato strutturale 210, 211 e 212 formano assieme una regione strutturale 202 di silicio

poroso. La regione strutturale 202 forma, con il substrato 201, il corpo semiconduttore 3 (dove la prima superficie principale 3A è in corrispondenza della regione strutturale 202 e la seconda superficie principale 3B è in corrispondenza del substrato 201).

Inoltre, figura 9D, sul secondo strato strutturale 212 viene formato l'elemento piezoelettrico 19, analogamente a quanto precedentemente descritto con riferimento alla figura 8G.

In seguito, figura 9E, viene eseguito un primo attacco ("etch") profondo del silicio dalla seconda superficie principale 3B fino a raggiungere la regione sacrificale 207, realizzando le trincee laterali 22 e le aperture laterali 11. Inoltre, questo attacco realizza anche parte della trincea centrale 22 (fino a raggiungere la posizione della seconda camera 20) e l'apertura centrale 12.

In figura 9F, viene eseguito un secondo attacco (chimico, es. tramite HF) per rimuovere la regione sacrificale 207, ad esempio a partire dalla prima superficie principale 3A e attraverso la regione strutturale 202. Dato che tale tipo di attacco consente la rimozione di ossido di silicio (cioè della regione sacrificale 207), ma non asporta il silicio, al termine dell'attacco nella fetta 200 si formano la prima e la seconda cavità 15 e 20 e la parte della trincea centrale 22 fra esse compresa, ottenendo così il

dispositivo MUT 1.

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 1 permette, grazie alla seconda camera 20 e alle trincee 21 e 22 di ciascun elemento MUT 5, il ricircolo dell'aria presente nelle prime cavità 15. È stato verificato che questo aumenta lo smorzamento delle oscillazioni delle membrane 18, riducendo
10 quindi l'intervallo di ring-down T_{down} . Ciò riduce la probabilità di sovrapposizione fra l'onda emessa W_e e l'onda riflessa W_r ed aumenta la distanza relativa minima rilevabile fra l'oggetto da rilevare e il dispositivo MUT 1. In dettaglio, questo è dovuto al fatto che il ricircolo d'aria
15 genera una perdita di energia nelle oscillazioni delle membrane 18 ed evita il riscaldamento dell'aria presente nelle prime cavità 15, dovuto alle oscillazioni delle membrane 18 che comprimono periodicamente i volumi delle prime cavità 15. Poiché le oscillazioni di ring-down delle
20 membrane 18 sono funzione della temperatura dell'aria nelle prime cavità 15, prevenire un aumento di temperatura nelle prime cavità 15 evita l'amplificazione delle oscillazioni delle membrane 18, migliorando così l'accuratezza di misura del dispositivo MUT 1. In altre parole, la larghezza di banda
25 dello spettro energetico delle oscillazioni delle membrane

18 cresce e, ad esempio, può superare il 35% (a differenza dei trasduttori ultrasonici noti in cui è generalmente inferiore al 5%).

Inoltre, la struttura di ciascun elemento MUT 5 è appositamente progettata per migliorare la sua risposta in frequenza. In particolare, sebbene il ricircolo d'aria nella prima cavità 15 possa introdurre picchi spuri nello spettro in frequenza della pressione acustica presente sulla membrana 18 (cioè picchi aggiuntivi rispetto a quello desiderato che è indicativo delle oscillazioni della membrana 18 causate dall'onda emessa W_e e dall'onda riflessa W_r), avere le membrane 18 in corrispondenza della prima superficie principale 3A del corpo semiconduttore 3 e le trincee centrali e laterali 22, 21 affacciate alla seconda superficie principale 3B del corpo semiconduttore 3 minimizza il numero e l'ampiezza di tali picchi spuri e ne aumenta la distanza in frequenza rispetto al picco indicativo dell'onda emessa W_e e dell'onda riflessa W_r ; ciò impedisce che tali eventuali picchi spuri possano sovrapporsi al picco indicativo dell'onda emessa W_e e dell'onda riflessa W_r , e quindi che possano influenzare la misura della distanza dell'oggetto da rilevare (come invece capiterebbe se almeno parte delle trincee 21 e 22 fossero affacciate alla prima superficie principale 3A a cui sono affacciate anche le membrane 18).

La struttura degli elementi MUT 5 permette il rilevamento della distanza degli oggetti da rilevare senza richiedere l'utilizzo di algoritmi di post-processing dei segnali rilevati, e minimizza la dipendenza della misura da fattori esterni variabili quali le proprietà del mezzo di propagazione (a differenza delle soluzioni note).

Il dispositivo MUT 1 ha dimensioni esterne ridotte ed elevata flessibilità e versatilità.

Ad esempio, con la soluzione descritta, è possibile realizzare una piastrina 2 di lato $S = 20$ mm comprendente 1600 (40x40) elementi MUT 5 aventi ciascuno diametro K (dimensione della seconda camera 20, si veda la figura 3) di $460\text{ }\mu\text{m}$ e posti a distanza L di $40\text{ }\mu\text{m}$. Lo spessore della piastrina 2 (spessore del corpo semiconduttore 3) può essere tra 200 e $710\text{ }\mu\text{m}$.

Inoltre, in ciascun elemento MUT 5, la prima camera 15 può avere diametro di $350\text{ }\mu\text{m}$ e spessore $3,5\text{ }\mu\text{m}$, la seconda camera 20 può avere diametro di $460\text{ }\mu\text{m}$ e spessore $3\text{ }\mu\text{m}$, la distanza d_{cc} (figura 5) fra la prima camera 15 e la seconda camera 20 può essere variabile tra circa $3\text{ }\mu\text{m}$ e circa $40\text{ }\mu\text{m}$ e la membrana 18 può avere ad esempio spessore di circa $6\text{ }\mu\text{m}$. La trincea centrale 21 può avere diametro d_t compreso fra circa $3\text{ }\mu\text{m}$ e circa $60\text{ }\mu\text{m}$ e le trincee laterali 22 hanno diametro minore della trincea centrale 21 e ad esempio possono avere diametro di $13\text{ }\mu\text{m}$. La regione piezoelettrica

a film sottile 191 può avere spessore di 2 μm e l'elemento piezoelettrico 19 può avere spessore totale compreso fra 2,1 e 3 μm .

In particolare, la figura 10 mostra la dipendenza della larghezza di banda BW (es., a -3 dB) dello spettro energetico delle oscillazioni delle membrane 18 in funzione della distanza d_{cc} e del diametro d_t . Al crescere della distanza d_{cc} cresce il valor massimo di larghezza di banda BW, e al crescere del diametro d_t la larghezza di banda BW presenta andamento crescente e poi decrescente, con il valor massimo di larghezza di banda BW che è a diametri d_t che crescono quanto più decresce la distanza d_{cc} . In particolare, la larghezza di banda BW è massimizzata quando il diametro d_t è compreso fra circa 10 μm e circa 35 μm e la distanza d_{cc} è compresa fra circa 5 μm e circa 30 μm .

I valori sopra indicati sono tuttavia solo indicativi e in particolare la forma e le dimensioni delle camere 15, 20 e delle trincee 21, 22 possono variare ampiamente, a seconda dell'applicazione e dei volumi di flusso desiderati.

Ad esempio, secondo una diversa forma di realizzazione (figura 11) il dispositivo MUT 1 comprende una pluralità di elementi MUT 5 di forma quadrangolare, ad esempio quadrata, di lato $K = 350 \mu\text{m}$ (lato della seconda camera 20), disposti a distanza $L = 40 \mu\text{m}$. Anche l'elemento piezoelettrico 19 è qui quadrato. Altre forme (ad esempio ovale, esagonale,

ottagonale, ecc.) e altre dimensioni sono tuttavia possibili.

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

Ad esempio, la forma delle trincee laterali 21 e delle aperture laterali 12 può variare, così come il loro numero
10 (es., tre o più aperture laterali 12 per ogni elemento MUT 5 e con forma arcuata, a settore di corona circolare, allineate circonferenzialmente fra loro; oppure due aperture laterali 12 opposte fra loro rispetto all'apertura centrale 11, o anche solo un'apertura laterale 12). Inoltre, le
15 trincee laterali 21 possono essere collegate ad un unico canale di alimentazione che si apre all'esterno.

RIVENDICAZIONI

1. Dispositivo trasduttore ultrasonico MEMS, MUT, (1),
comprendente un corpo semiconduttore (3) di materiale
semiconduttore avente una prima (3A) ed una seconda (3B)
5 superficie principale ed integrante un primo elemento MUT
(5) che include:

una prima camera (15) estendentesi nel corpo
semiconduttore (3) a distanza dalla prima superficie
principale (3A);

10 una membrana (18) formata dal corpo semiconduttore (3)
fra la prima superficie principale (3A) e la prima camera
(15);

un elemento piezoelettrico (19) estendentesi sulla
prima superficie principale (3A) del corpo semiconduttore
15 (3) al di sopra della membrana (18);

una seconda camera (20) estendentesi nel corpo
semiconduttore (3) fra la prima camera (15) e la seconda
superficie principale (3B);

un passaggio fluidico centrale (22) estendentesi nel
20 corpo semiconduttore (3) dalla seconda superficie principale
(3B) fino alla prima camera (15) ed attraversante la seconda
camera (20); e

uno o più passaggi fluidici laterali (21) estendentesi
nel corpo semiconduttore (3) dalla seconda superficie
25 principale (3B) fino alla seconda camera (20),

in cui l'uno o più passaggi fluidici laterali (21), il
passaggio fluidico centrale (22) e la seconda camera (20)
definiscono un percorso fluidico di ricircolo che collega
fluidicamente la prima camera (15) con l'esterno del corpo
5 semiconduttore (3).

2. Dispositivo MUT secondo la rivendicazione 1,
configurato per esser immerso in un mezzo di propagazione
liquido o gassoso che dall'esterno del corpo semiconduttore
(3) si estende fino alla prima camera (15),

10 in cui il percorso fluidico di ricircolo è configurato
per permettere il ricircolo del mezzo di propagazione tra la
prima camera (15) e l'esterno del corpo semiconduttore (3),
detto ricircolo essendo causato dalla successione alternata
di espansioni e contrazioni di un volume della prima e della
15 seconda camera (15, 20), che sono generate dalle oscillazioni
della membrana (18) e che pompano il mezzo di propagazione
dentro e, rispettivamente, fuori la prima camera (15).

3. Dispositivo MUT secondo la rivendicazione 1 o 2, in
cui la prima (15) e la seconda (20) camera sono concentriche
20 ed allineate lungo un asse centrale (25) del primo elemento
MUT (5), ortogonale alla prima superficie principale (3A),

in cui il passaggio fluidico centrale (22) è disposto
centralmente rispetto alla prima (15) e alla seconda (20)
camera ed è allineato lungo l'asse centrale (25), e

25 in cui l'uno o più passaggi fluidici laterali (21) sono

radialmente esterni rispetto al passaggio fluidico centrale (22) attorno all'asse centrale (25).

4. Dispositivo MUT secondo la rivendicazione 3, comprendente una pluralità di detti passaggi fluidici
5 laterali (21) che sono disposti attorno al passaggio fluidico centrale (22).

5. Dispositivo MUT secondo la rivendicazione 4, in cui i passaggi fluidici laterali (21) hanno, parallelamente alla seconda superficie principale (3B), forma arcuata e
10 circondano lateralmente a distanza il passaggio fluidico centrale (22).

6. Dispositivo MUT secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui la prima e la seconda camera (15, 20) hanno forma circolare oppure hanno forma
15 poligonale.

7. Dispositivo MUT secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui l'elemento piezoelettrico (19) comprende una pila di strati (182) includente un primo ed un secondo elettrodo (183, 184) ed una regione
20 piezoelettrica a film sottile (191) disposta fra il primo e il secondo elettrodo,

il dispositivo MUT comprendendo inoltre una pluralità di linee di connessione elettrica (6) configurate in modo da accoppiare selettivamente almeno uno fra il primo e il
25 secondo elettrodo (183, 184) del primo elemento MUT (5) ad

un'unità di comando (8).

8. Dispositivo MUT secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui il passaggio fluidico centrale (22) è formato da una trincea centrale che definisce
5 un'apertura centrale (11) nella seconda superficie principale (3B), e

in cui l'uno o più passaggi fluidici laterali (21) sono formati da una o più rispettive trincee laterali, ciascuna definente una rispettiva apertura laterale (12) nella
10 seconda superficie principale (3B).

9. Dispositivo MUT secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, integrante inoltre uno o più secondi elementi MUT (5), ciascuno includendo:

una rispettiva prima camera (15) estendentesi nel corpo
15 semiconduttore (3) a distanza dalla prima superficie principale (3A);

una rispettiva membrana (18) formata dal corpo semiconduttore (3) fra la prima superficie principale (3A) e la prima camera (15) del secondo elemento MUT (5);

20 un rispettivo elemento piezoelettrico (19) estendentesi sulla prima superficie principale (3A) del corpo semiconduttore (3) al di sopra della membrana (18) del secondo elemento MUT (5);

una rispettiva seconda camera (20) estendentesi nel
25 corpo semiconduttore (3) fra la prima camera (15) del secondo

elemento MUT (5) e la seconda superficie principale (3B);

un rispettivo passaggio fluidico centrale (22) estendentesi nel corpo semiconduttore (3) dalla seconda superficie principale (3B) fino alla prima camera (15) del
5 secondo elemento MUT (5) ed attraversante la seconda camera (20) del secondo elemento MUT (5); e

uno o più rispettivi passaggi fluidici laterali (21) estendentisi nel corpo semiconduttore (3) dalla seconda superficie principale (3B) fino alla seconda camera (20) del
10 secondo elemento MUT (5),

in cui l'uno o più passaggi fluidici laterali (21), il passaggio fluidico centrale (22) e la seconda camera (20) del secondo elemento MUT (5) definiscono un rispettivo percorso fluidico di ricircolo che collega fluidicamente la
15 prima camera (15) del secondo elemento MUT (5) con l'esterno del corpo semiconduttore (3).

10. Procedimento di fabbricazione di un dispositivo trasduttore ultrasonico MEMS, MUT, (1), comprendente le fasi di:

20 formare, in un corpo semiconduttore (3) di materiale semiconduttore avente una prima (3A) ed una seconda (3B) superficie principale, una prima camera (15) estendentesi nel corpo semiconduttore (3) a distanza dalla prima superficie principale (3A), in cui una porzione del corpo
25 semiconduttore (3) estendentesi fra la prima superficie

principale (3A) e la prima camera (15) forma una membrana (18);

formare nel corpo semiconduttore (3) una seconda camera (20) estendentesi fra la prima camera (15) e la seconda
5 superficie principale (3B);

formare, sulla prima superficie principale (3A) del corpo semiconduttore (3) e al di sopra della membrana (18), un elemento piezoelettrico (19);

formare nel corpo semiconduttore (3) un passaggio
10 fluidico centrale (22) estendentesi dalla seconda superficie principale (3B) fino alla prima camera (15) ed attraversante la seconda camera (20); e

formare nel corpo semiconduttore (3) uno o più passaggi fluidici laterali (21) estendentisi dalla seconda superficie
15 principale (3B) fino alla seconda camera (20),

in cui la prima camera (15), la membrana (18), l'elemento piezoelettrico (19), la seconda camera (20), il passaggio fluidico centrale (22) e l'uno o più passaggi fluidici laterali (21) definiscono un primo elemento MUT (5)
20 del dispositivo MUT (1), e

in cui l'uno o più passaggi fluidici laterali (21), il passaggio fluidico centrale (22) e la seconda camera (20) definiscono un percorso fluidico di ricircolo che collega fluidicamente la prima camera (15) con l'esterno del corpo
25 semiconduttore (3).

11. Procedimento secondo la rivendicazione 10, in cui formare il passaggio fluidico centrale (22) comprende rimuovere una porzione selettiva della fetta di materiale semiconduttore (100) a partire dalla seconda faccia (3B) attraversando la seconda camera (20) fino alla prima camera (15), e

in cui formare l'uno o più passaggi fluidici laterali (21) comprende rimuovere una o più rispettive porzioni selettive della fetta di materiale semiconduttore (100) a partire dalla seconda faccia (3B) fino alla seconda camera (20).

12. Procedimento secondo la rivendicazione 10 o 11, in cui:

formare la seconda camera (20) comprende: formare una pluralità di prime trincee (102) separate reciprocamente da prime strutture a colonna (103) in un substrato (100) di materiale semiconduttore; eseguire una crescita epitassiale in ambiente riducente in modo da formare un primo strato superficiale di materiale semiconduttore (105) chiudente superiormente le prime trincee (102); ed effettuare un trattamento termico tale da provocare una migrazione di atomi di materiale semiconduttore delle prime strutture a colonne (103) e la formazione della seconda camera (20), e

formare la prima camera (15) comprende eseguire una seconda crescita epitassiale per formare una regione spessa

(108); realizzare una pluralità di seconde trincee separate reciprocamente da seconde strutture a colonna nella regione spessa; eseguire una seconda crescita epitassiale in ambiente riducente in modo da formare un secondo strato
5 superficiale di materiale semiconduttore chiudente superiormente le seconde trincee; ed effettuare un trattamento termico tale da provocare una migrazione di atomi di materiale semiconduttore delle seconde strutture a colonna e la formazione della prima camera (15) e della
10 membrana (18).

13. Procedimento secondo la rivendicazione 12, comprendente, prima di formare il passaggio fluidico centrale (22), formare uno o più fori (115) estendentisi dalla prima faccia (3A) della fetta di materiale
15 semiconduttore (100) fino alla prima camera (15) e formare uno strato di ossido (16A) rivestente la prima camera (15) e chiudente l'uno o più fori (115).

14. Procedimento secondo la rivendicazione 10 o 11, in cui formare la prima camera (15) e formare la seconda camera
20 (20) comprendono:

formare, su una prima faccia (201A) di un substrato (201) di materiale semiconduttore, una prima regione sacrificale (204) atta a formare la seconda cavità (20);

formare, sulla prima faccia (201A) del substrato (201)
25 e sulla prima regione sacrificale (204), un primo strato

strutturale (210) di silicio poroso e una seconda regione sacrificale (205) sovrapposta alla, e a contatto con la, prima regione sacrificale (204) e atta a formare una porzione del passaggio fluidico centrale (22) compresa fra la prima
5 cavità (15) e la seconda cavità (20), il primo strato strutturale (210) estendendosi lateralmente alla seconda regione sacrificale (205);

formare, sul primo strato strutturale (210) e sulla seconda regione sacrificale (205), un secondo strato
10 strutturale (211) di silicio poroso e una terza regione sacrificale (206) sovrapposta a, e a contatto con, la seconda regione sacrificale (205) e parte del primo strato strutturale (210) e atta a formare la prima cavità (15), il secondo strato strutturale (211) estendendosi lateralmente
15 alla terza regione sacrificale (206);

formare, sul secondo strato strutturale (211) e sulla terza regione sacrificale (206), un terzo strato strutturale (212) di silicio poroso atto a formare la membrana (18); e

rimuovere la prima, la seconda e la terza regione
20 sacrificale (204, 205, 206) tramite attacco chimico attraverso il primo, il secondo e il terzo strato strutturale (210, 211, 212), formando rispettivamente la prima cavità (15), la porzione del passaggio fluidico centrale (22) compresa fra la prima cavità (15) e la seconda cavità (20),
25 e la seconda cavità (20).

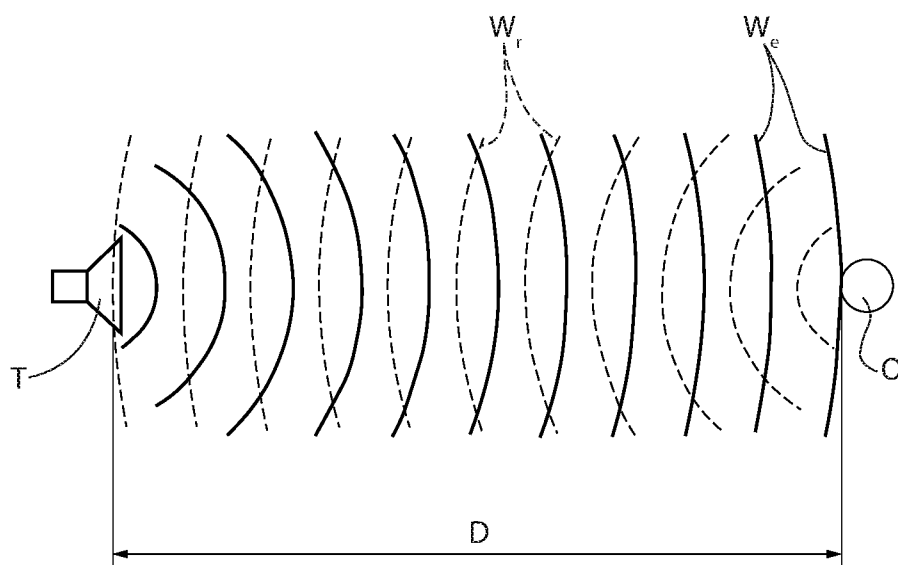


FIG.1

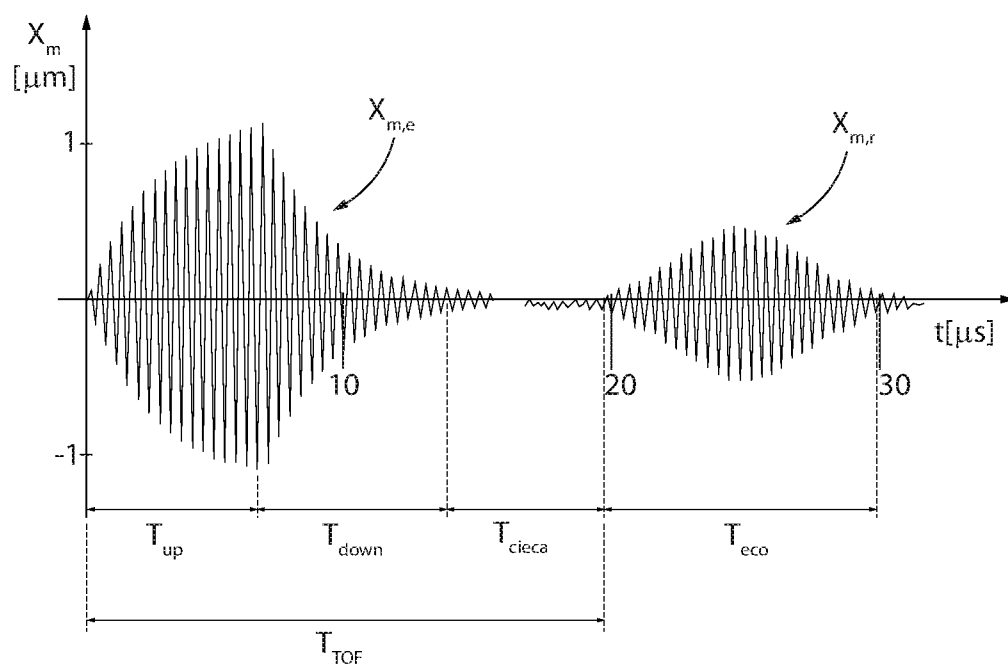
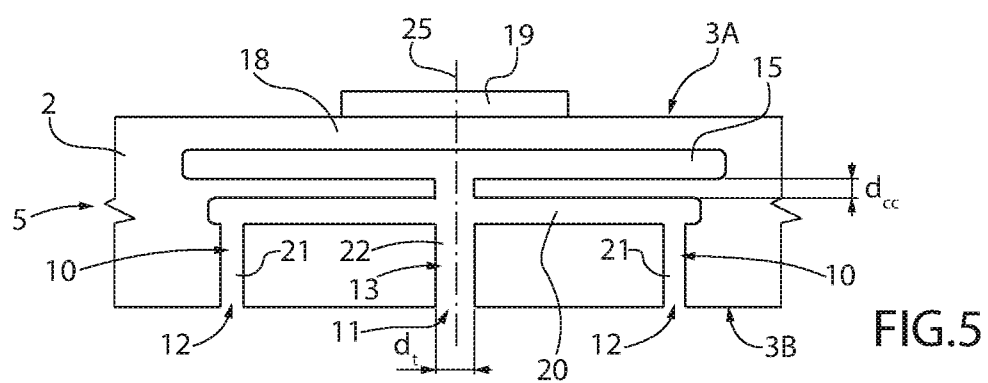
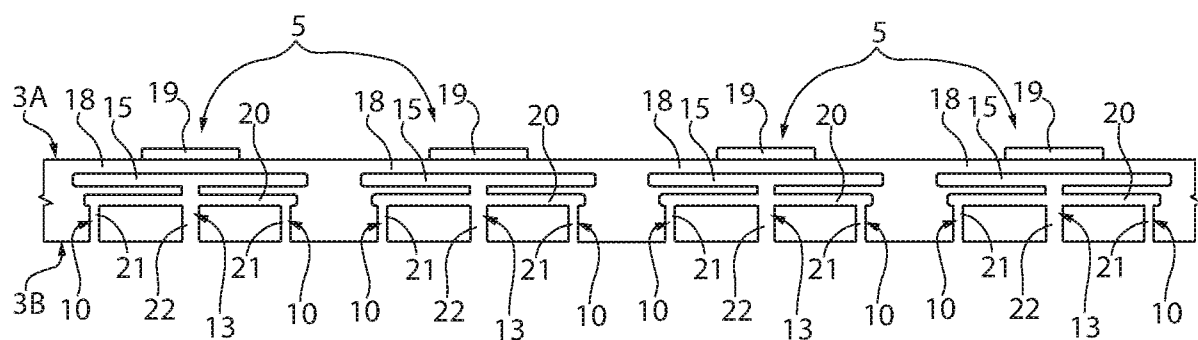
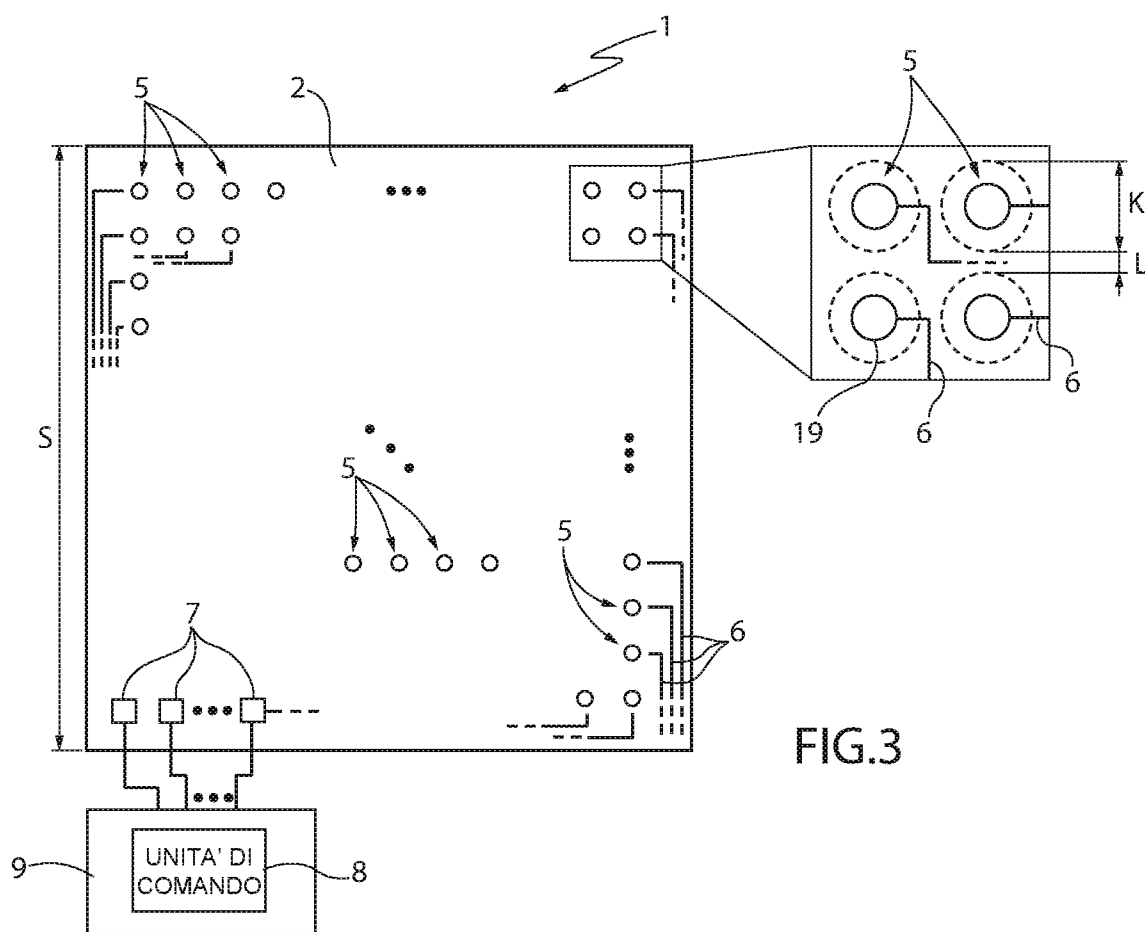
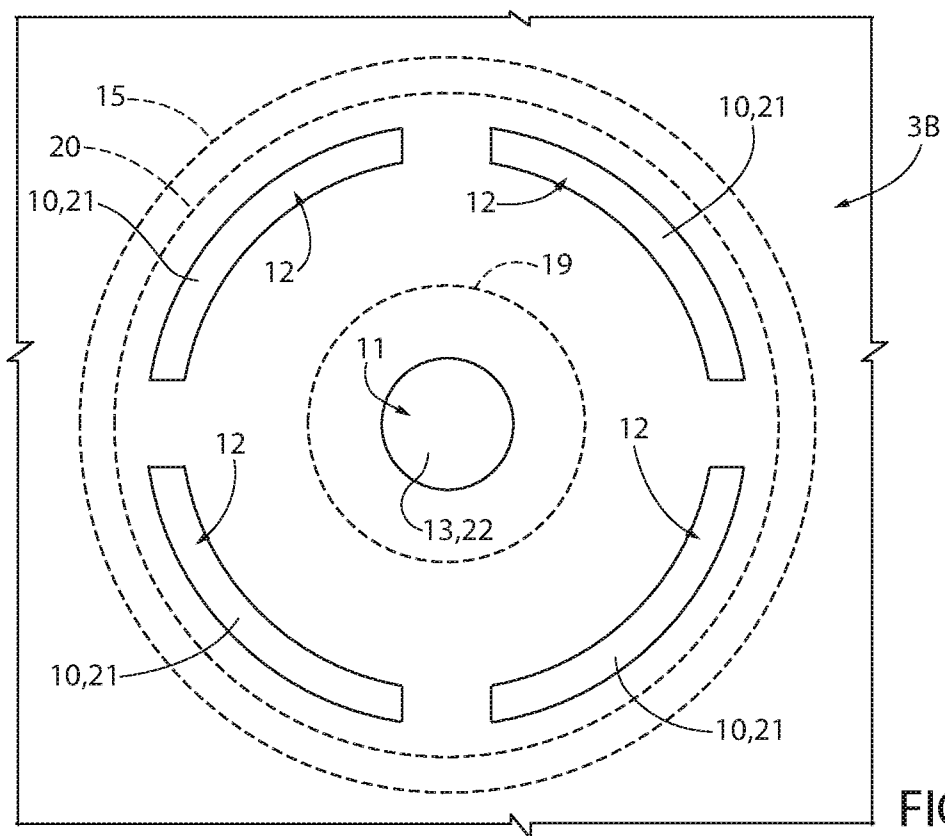
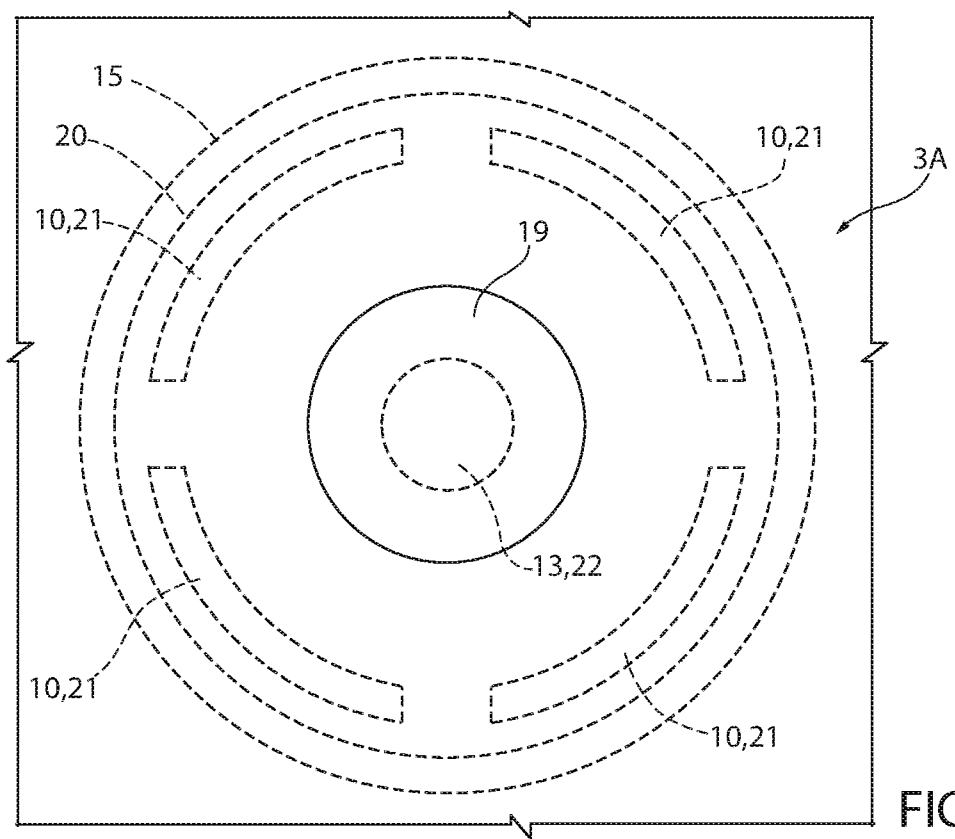


FIG.2





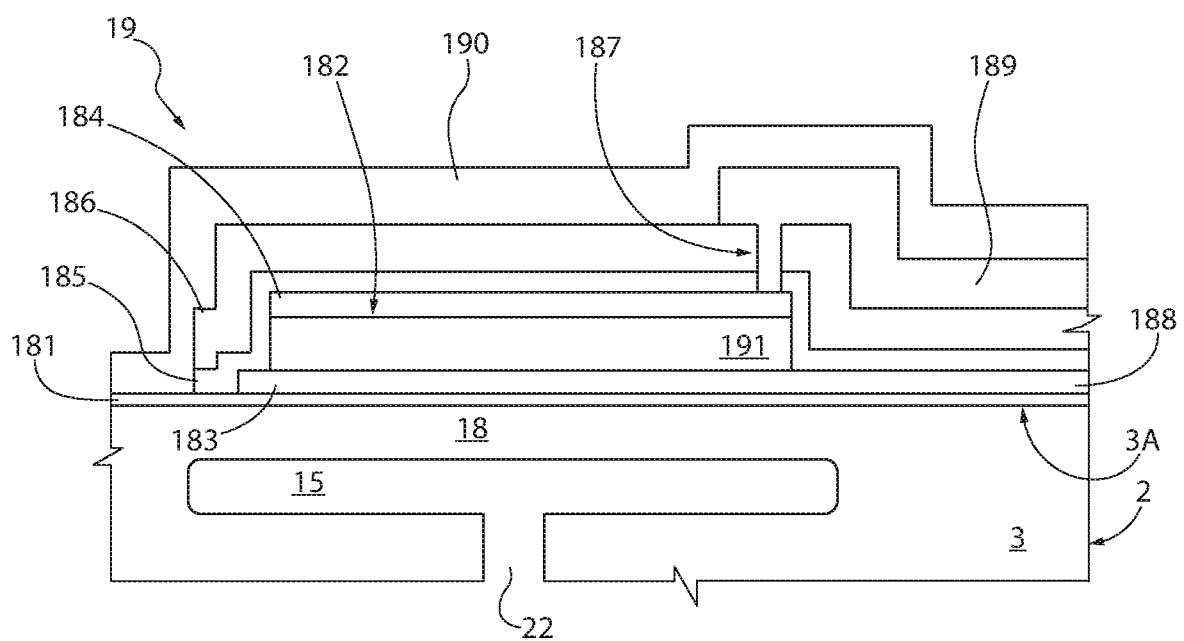


FIG.7

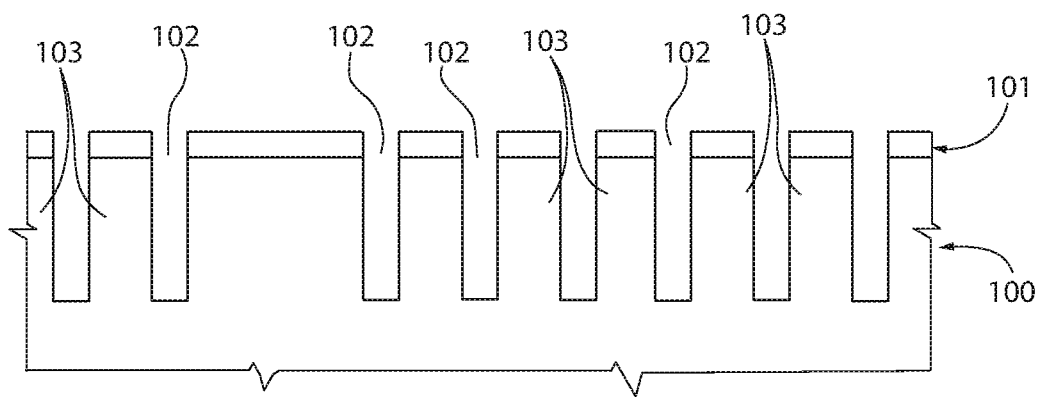


FIG. 8A

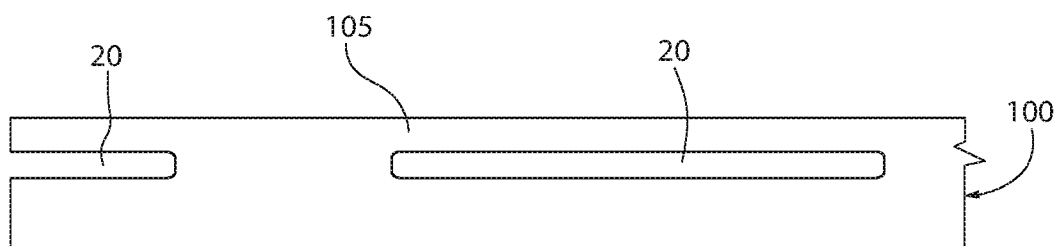


FIG. 8B

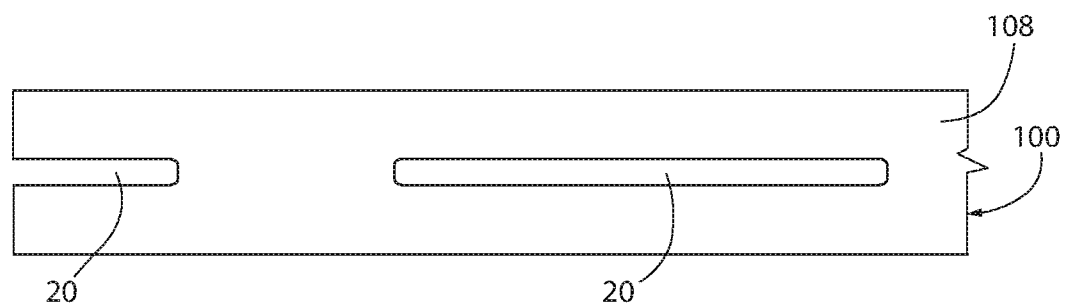


FIG. 8C

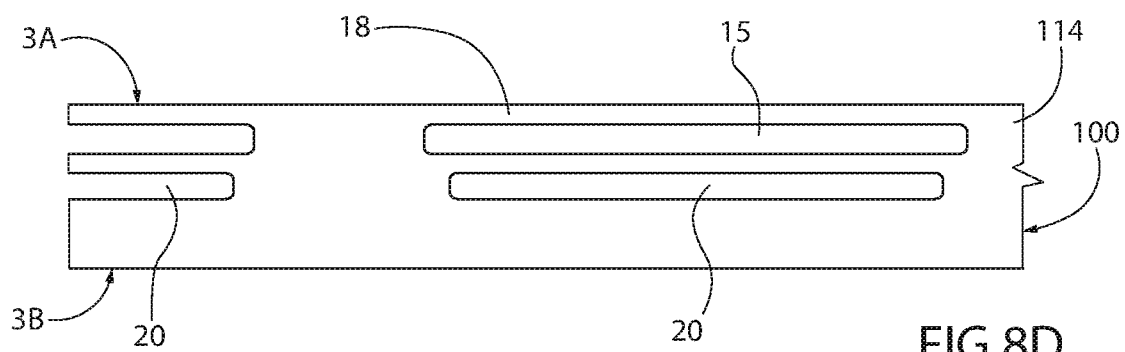


FIG. 8D

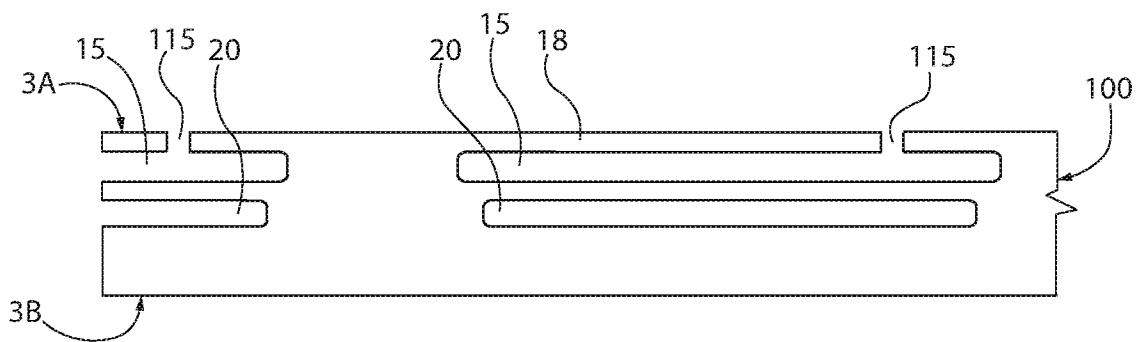


FIG. 8E

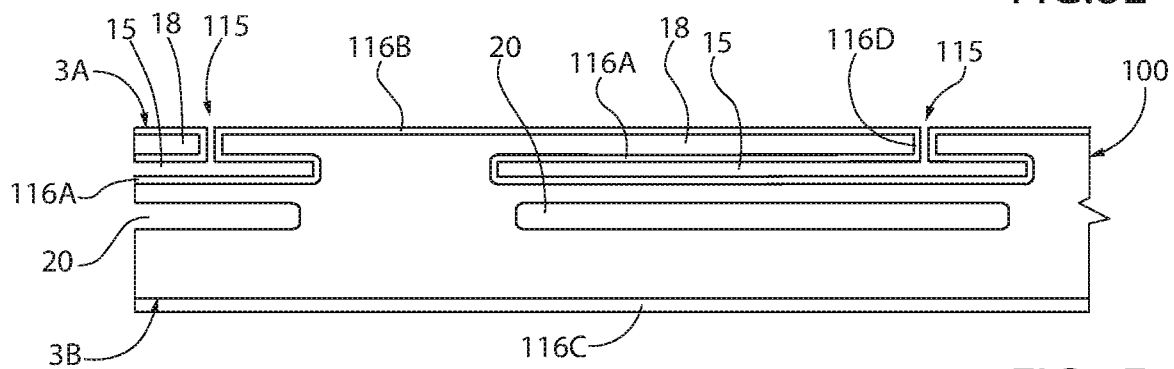


FIG. 8F

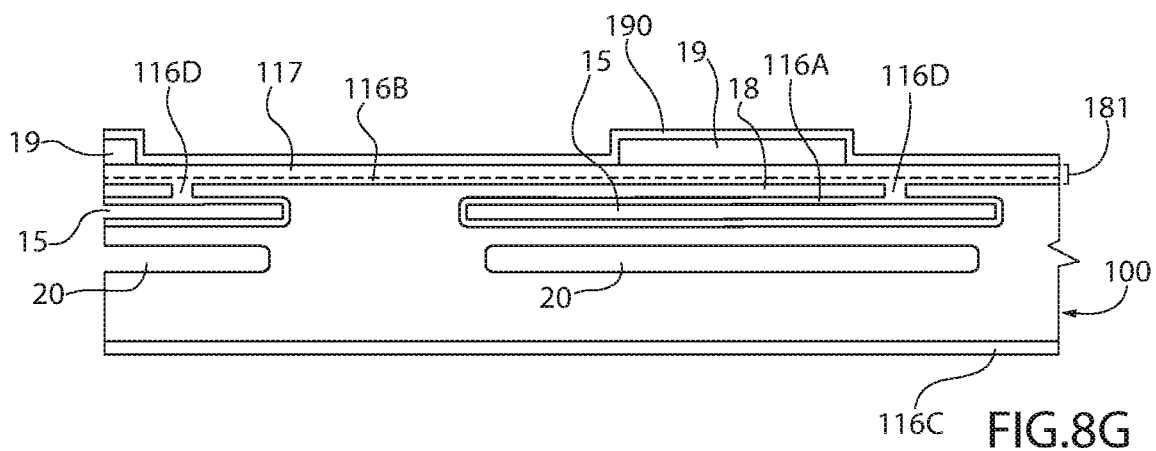


FIG. 8G

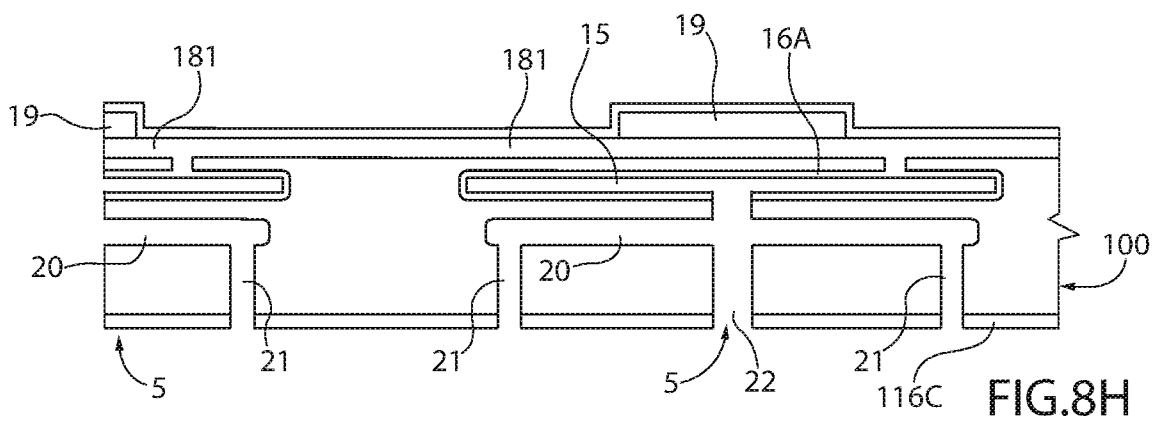
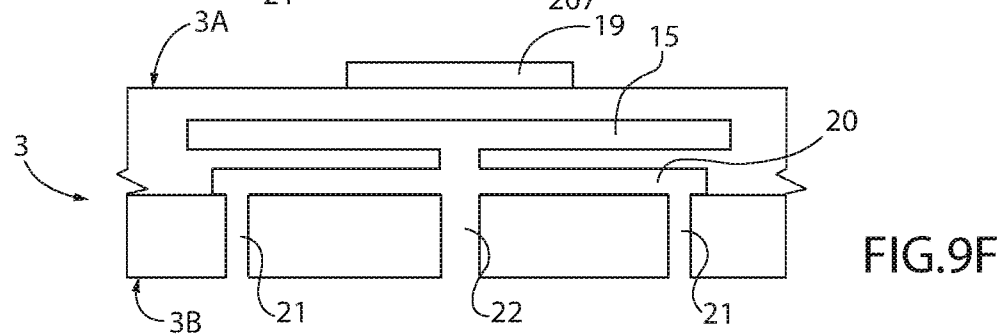
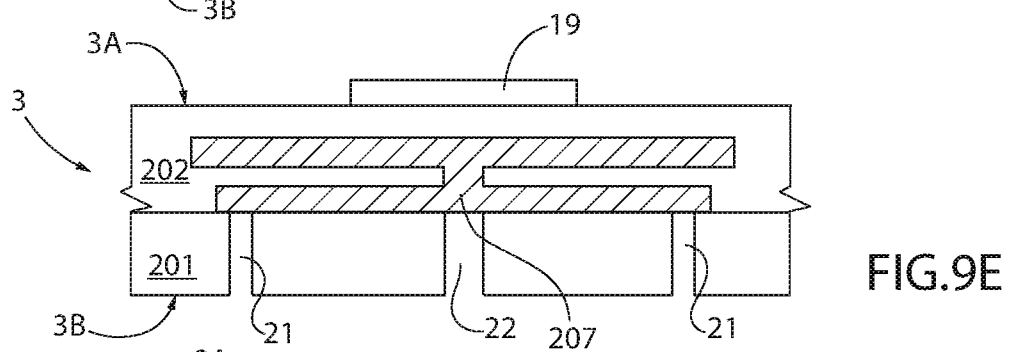
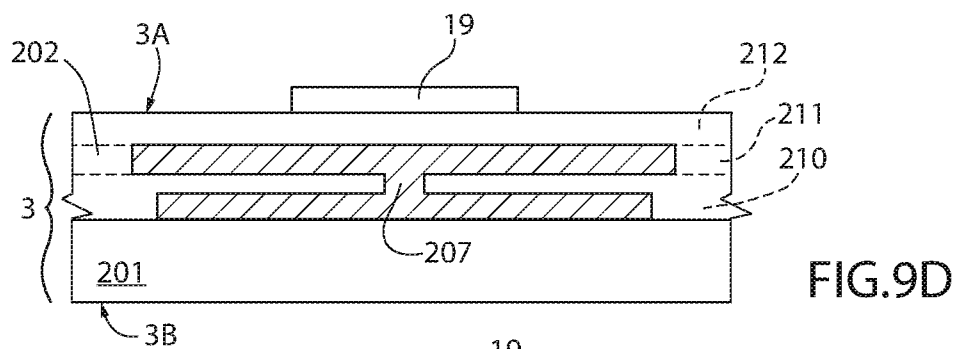
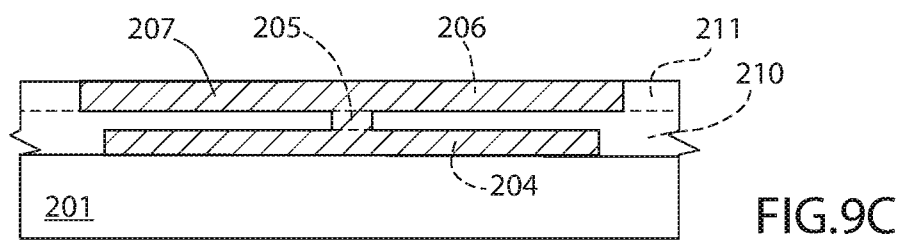
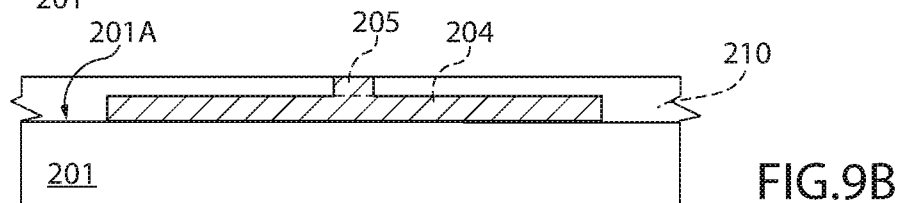
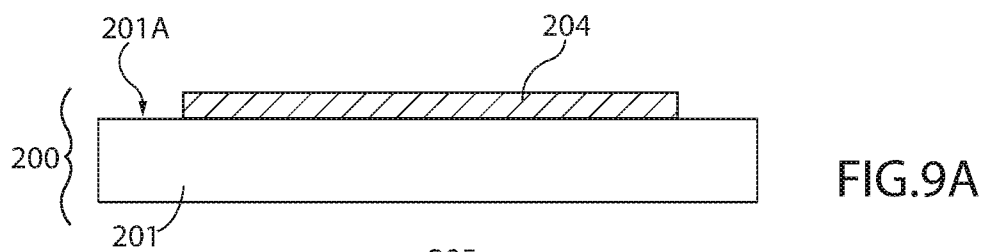


FIG. 8H



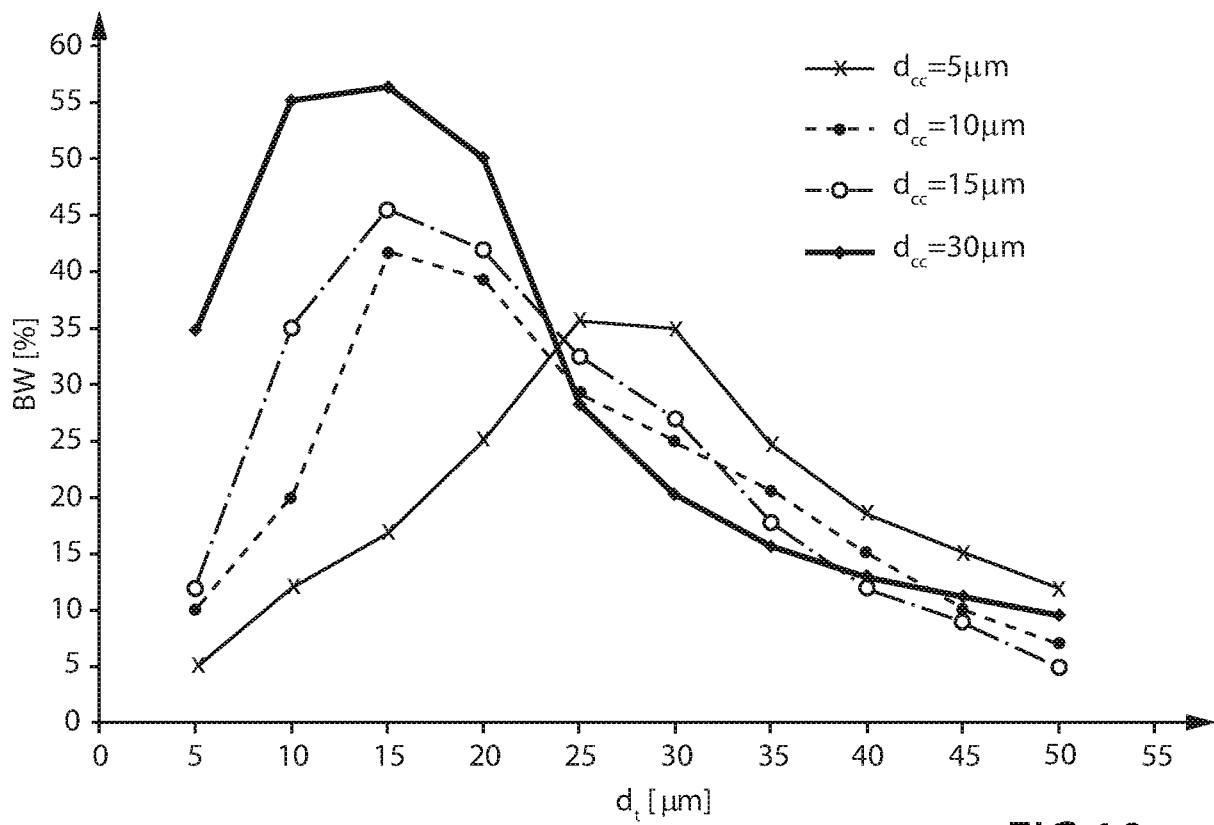


FIG.10

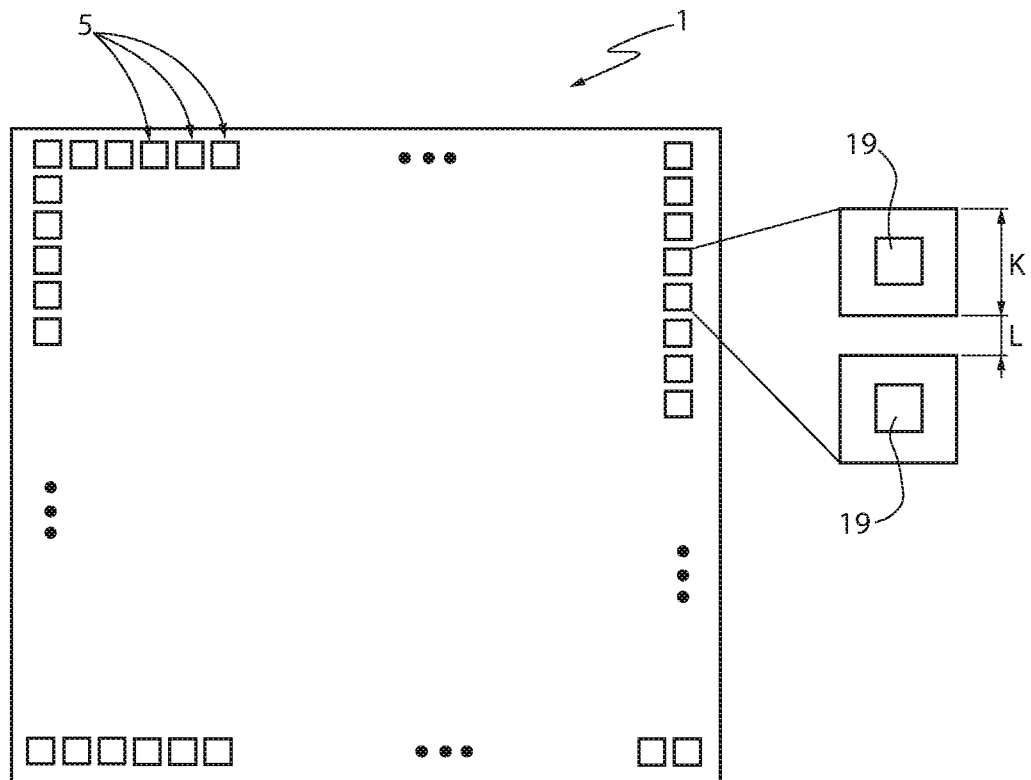


FIG.11