

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102008901685331A1

Publication Date

20100609

Applicant

STMICROELECTRONICS (ROUSSET) SAS

Title

DISPOSITIVO A MICROBILANCIA TORSIONALE INTEGRATA IN
TECNOLOGIA MEMS E RELATIVO PROCESSO DI FABBRICAZIONE

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"DISPOSITIVO A MICROBILANCIA TORSIONALE INTEGRATA IN
TECNOLOGIA MEMS E RELATIVO PROCESSO DI FABBRICAZIONE"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI, 2

AGRATE BRIANZA (MI)

Inventori: PACI Dario, PIERI Francesco, TOSCANO Pietro

La presente invenzione è relativa ad un dispositivo a microbilancia torsionale integrata in tecnologia MEMS e al relativo processo di fabbricazione.

Una microbilancia, tipicamente realizzata con tecnologia MEMS, è una struttura meccanica pilotata da un segnale elettrico che ne causa un movimento oscillatorio, preferibilmente alla frequenza di risonanza della struttura meccanica. La figura 1 mostra uno schema a blocchi di un sistema di controllo 1 di tipo noto utilizzato per attuare una microbilancia. Il sistema di controllo 1 comprende un primo trasduttore 2, che riceve su un suo ingresso un segnale di pilotaggio V_{in} generato da un'opportuna elettronica di pilotaggio 4 e, sulla base del segnale di pilotaggio V_{in} ricevuto, genera una forza F su una microbilancia 10, tale da causarne l'oscillazione

preferibilmente ad una frequenza di risonanza f_0 , specifica della struttura meccanica della microbilancia 10. Eventi esterni, come ad esempio un cambiamento della massa della microbilancia 10 dovuto al deposito di materiale M sulla microbilancia 10, causano uno spostamento Δf_0 della frequenza di oscillazione dalla frequenza di risonanza f_0 . Un secondo trasduttore 3 trasforma le oscillazioni della microbilancia 10 in un segnale elettrico, generando in uscita un segnale di uscita V_0 che varia in modo dipendente dalla frequenza di oscillazione della microbilancia 10. Il segnale di uscita V_0 viene quindi fornito ad un'elettronica di elaborazione 5 per successive fasi di elaborazione.

Le figure 2 e 3 mostrano, rispettivamente in vista dall'alto e in vista prospettica, una possibile forma di realizzazione della microbilancia 10 e di parte del sistema di controllo 1 (l'elettronica di pilotaggio 4 per generare il segnale di pilotaggio V_{in} e l'elettronica di elaborazione 5 per elaborare il segnale di uscita V_0 non sono mostrate). Un sistema di controllo 1 di questo tipo, insieme con la microbilancia 10, è descritto ad esempio in "A CMOS-compatible bulk technology for the fabrication of magnetically actuated microbalances for chemical sensing", A. Nannini, D. Paci, F. Peri, P. Toscano, *Sensors and Actuators B*, vol. 118, pp. 343-348, 2006, e in "A CMOS-compatible, magnetically actuated resonator for mass

sensing applications", D. Paci, F. Pieri, P. Toscano, A. Nannini, *Sensos and Actuators B*, vol. 129, pp. 10-17, 2008.

Con riferimento congiunto alle figure 2 e 3, la microbilancia 10 comprende un corpo mobile 11, includente una porzione principale 17 preferibilmente di forma quadrata o rettangolare, sostenuto da un primo e da un secondo braccio 12, 13. Il primo ed il secondo braccio 12, 13 possiedono una rispettiva estremità solidale con la porzione principale 17, mentre l'altra estremità è solidale con un substrato 14.

Il primo ed il secondo braccio 12, 13 sono inoltre allineati lungo un asse di simmetria 15 passante per il baricentro del corpo mobile 11.

Il corpo mobile 11 possiede almeno un'apertura 16, preferibilmente di forma quadrata o rettangolare ed avente il proprio baricentro disposto sull'asse di simmetria 15. L'apertura 16 ha la funzione, durante le fasi di fabbricazione della microbilancia 10 (come meglio descritto nel seguito), di permettere la rimozione dello/degli strato/i di materiale sottostanti (ad esempio il substrato 14) e realizzare una struttura sospesa, sostenuta dal primo e dal secondo braccio 12, 13.

Il corpo mobile 11 comprende inoltre un avvolgimento di attuazione 20 ed un avvolgimento di rilevazione 21, integrati nel corpo mobile 11 su livelli metallici

differenti (ad esempio l'avvolgimento di rilevazione 21 è formato su un primo livello metallico e l'avvolgimento di attuazione 20 su un secondo livello metallico o viceversa). L'avvolgimento di attuazione 20 comprende una prima porzione di connessione 20' ed una spira di attuazione 20'', entrambe di materiale conduttivo ed elettricamente connesse tra loro, mentre l'avvolgimento di rilevazione 21 comprende una seconda porzione di connessione 21' ed una pluralità di spire di rilevazione 21'' concentriche, entrambe di materiale conduttivo ed elettricamente connesse tra loro. La prima porzione di connessione 20' realizza una porta di ingresso 22 dell'avvolgimento di attuazione 20 e la seconda porzione di connessione 21' una porta di uscita 23 dell'avvolgimento di rilevazione 21.

La spira di attuazione 20'' percorre la porzione principale 17 lungo il suo perimetro, parallelamente ai lati della porzione principale 17. Similmente, anche le spire di rilevazione 21'' percorrono la porzione principale 17 lungo il suo perimetro e possono essere parzialmente sovrapposte alla spira di attuazione 20'' ma non in contatto elettrico diretto.

Una coppia di magneti 25 (o, in alternativa, un singolo magnete permanente) sono disposti in prossimità della microbilancia 10, su lati opposti della stessa, in modo da generare un campo magnetico **B** avente linee di campo

con direzione perpendicolare all'asse di simmetria 15 passante per il primo e al secondo braccio 12, 13. I magneti 25 possono essere, ad esempio, magneti permanenti di neodimio ferro boro (NdFeB), aventi dimensioni inferiori a 1mm^3 , in grado di generare un campo magnetico di circa 0.1 T.

Se sulla porta di ingresso 22 dell'avvolgimento di attuazione 20 viene applicata una tensione di ingresso V_{in} per generare una corrente I_{in} attraverso l'avvolgimento di attuazione 20, sui lati della microbilancia 10 ortogonali alle linee di campo del campo magnetico $\mathbf{B}$ si esercita, come noto, la forza di Lorentz $\mathbf{F}$, data da:

$$\mathbf{F} = \underline{l} \cdot I_{in} \cdot \mathbf{i} \wedge \mathbf{B} \quad (1)$$

dove $\underline{l}$ è la lunghezza della porzione dell'avvolgimento di attuazione 20 che giace sul lato su cui si esercita la forza di Lorentz $\mathbf{F}$, e $\mathbf{i}$ è un vettore con modulo unitario e direzione parallela alla porzione dell'avvolgimento di attuazione 20 su cui si esercita la forza di Lorentz $\mathbf{F}$ e stesso verso della corrente I_{in} .

La forza di Lorentz $\mathbf{F}$ è invece nulla sui lati della microbilancia 10 paralleli alle linee di campo del campo magnetico $\mathbf{B}$.

Si genera quindi sulla microbilancia 10 un momento torcente τ che induce una rotazione del corpo mobile 11 attorno all'asse di simmetria 15:

$$\tau = \sum_i F_i \wedge b_i, \quad (2)$$

dove F_i è la forza che agisce sull' i -esima spira dell'avvolgimento di attuazione 20, e b_i è il braccio del momento che agisce sull' i -esima spira dell'avvolgimento di attuazione 20.

Dalle equazioni (1) e (2) si ottiene che il modulo τ_m del momento torcente τ è dato da:

$$\tau_m = 2blIB = A_{in}IB, \quad (3)$$

dove A_{in} è l'area sottesa dall'avvolgimento di attuazione 20 e B è il modulo del campo magnetico $\mathbf{B}$.

Nell'esempio specifico di figura 2, l'avvolgimento di attuazione 20 comprende una singola spira, e pertanto il momento torcente τ è dovuto solo alla forza di Lorentz $\mathbf{F}$ che agisce su lati opposti della singola spira dell'avvolgimento di attuazione 20.

Dall'equazione (3) si può assumere che il corpo mobile 11 della microbilancia 10 oscilla con una frequenza di oscillazione proporzionale alla frequenza della corrente I_{in} . Durante le oscillazioni del corpo mobile 11, il primo ed il secondo braccio 12, 13 hanno la funzione di molle torsionali. Se la frequenza della corrente I_{in} corrisponde alla frequenza di risonanza della microbilancia 10, l'ampiezza delle oscillazioni è massima.

Le oscillazioni del corpo mobile 11 sono rilevate, in presenza del campo magnetico $\mathbf{B}$, dall'avvolgimento di

rilevazione 21. Come noto, secondo la legge di Faraday-Lance, l'oscillazione del corpo mobile 11 in presenza del campo magnetico $\mathbf{B}$ causa un incremento del flusso di campo attraverso le spire dell'avvolgimento di rilevazione 21, generando una forza elettromotrice che si oppone alla variazione di flusso ai capi dell'avvolgimento di rilevazione 21 (porta di uscita 23). Se il corpo mobile 11 ruota rigidamente attorno all'asse di simmetria 15, la tensione di uscita V_{out} sulla porta di uscita 23 è data da:

$$V_{out} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t} = A_{out} B \frac{\partial \sin(\theta)}{\partial t}, \quad (4)$$

dove Φ_B è il flusso di campo magnetico $\mathbf{B}$ esterno, A_{out} è l'area sottesa dall'avvolgimento di rilevazione 21 e θ è l'angolo di rotazione del corpo mobile 11. Se l'angolo θ di rotazione del corpo mobile 11 è sufficientemente piccolo, l'equazione (4) si può approssimare come:

$$V_{out} \approx A_{out} B \frac{\partial \theta}{\partial t}. \quad (5)$$

Una possibile applicazione del sistema di controllo 1 riguarda la rilevazione di molecole organiche complesse come DNA o proteine. In questa applicazione l'utilizzo del sistema di controllo 1 fornisce una serie di vantaggi rispetto a metodi a lettura ottica comunemente utilizzati, basati ad esempio su tecniche a fluorescenza. Innanzitutto, non richiedendo ingombranti rivelatori ottici, è possibile realizzare un sistema di controllo 1 totalmente integrato; in secondo luogo, la lettura è estremamente semplice e

offre una sensibilità migliorata, permettendo di rilevare la presenza di particolari molecole e fornire una misura del peso, e quindi della quantità, di tali molecole; infine, non è necessario pretrattare il DNA o le proteine con una etichetta ("label") ottica.

Tuttavia, poiché la massa delle molecole o dei composti da rilevare è di norma estremamente piccola la sensibilità di microbilance MEMS del tipo descritto risulta generalmente insufficiente a rivelare concentrazioni di molecole al di sotto di una certa soglia di quantità minima.

Secondo la presente invenzione vengono descritti un dispositivo a microbilancia torsionale integrata in tecnologia MEMS ed il relativo processo di fabbricazione, come definito nelle rivendicazioni 1 e 14.

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

- la figura 1 mostra schematicamente un sistema di controllo di tipo noto, utilizzato per operare una microbilancia;
- la figura 2 mostra una vista dall'alto di una forma di realizzazione di tipo noto di una microbilancia e del relativo sistema di controllo di figura 1;

- la figura 3 mostra una vista prospettica della microbilancia di figura 2;
- la figura 4 mostra una vista dall'alto di una microbilancia secondo una forma di realizzazione della presente invenzione;
- le figure 5-11 mostrano una vista in sezione durante fasi di fabbricazione successive della microbilancia di figura 4;
- la figura 12 mostra una vista dall'alto di una microbilancia secondo un'ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione;
- le figure 13-16 mostrano una vista in sezione lungo una linea di sezione XIII-XIII durante fasi di fabbricazione successive della microbilancia di figura 12;
- le figure 17 e 18 mostrano una vista in sezione rispettivamente lungo una linea di sezione XVII-XVII e una linea di sezione XVIII-XVIII della microbilancia di figura 12 in seguito alle fasi di fabbricazione di figure 13-16;
- la figura 19 mostra una vista dall'alto di una microbilancia secondo un'ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione;
- la figura 20 mostra un sistema di comando e lettura di una microbilancia secondo una qualsiasi forma di

- realizzazione della presente invenzione;
- la figura 21 mostra curve di guadagno di sensibilità al variare di parametri fisici di microbilance provviste di appendici laterali secondo la presente invenzione;
 - le figure 22a-22c mostrano forme di realizzazione alternative di appendici laterali di una microbilancia secondo la presente invenzione; e
 - le figure 23 e 24 mostrano forme di realizzazione alternative di una microbilancia secondo la presente invenzione.

La figura 4 mostra una microbilancia 30 con sensibilità incrementata, secondo una forma di realizzazione. Elementi comuni della microbilancia 30 di figura 4 con la microbilancia 10 di figura 2 sono stati indicati in figura con gli stessi numeri di riferimento, e non vengono qui ulteriormente descritti.

Rispetto a microbilance di tipo noto (ad esempio la microbilancia 10 di figura 2), la microbilancia 30 di figura 4 comprende inoltre appendici 31 (anche chiamate "ali"), disposte su lati opposti della porzione principale 17 e solidali ad essa. Più in dettaglio, le appendici 31 si estendono in prolungamento della porzione principale 17 esternamente agli avvolgimenti di attuazione e rilevazione 20, 21, e sono solidali ai lati su cui agisce la forza di

Lorentz **F.**

Ad esempio, la porzione principale 17 della microbilancia 30 può avere forma rettangolare, con lati paralleli all'asse di simmetria 15 di lunghezza L_p compresa tra $50\mu\text{m}$ e $500\mu\text{m}$, ad esempio di $200\mu\text{m}$, lati perpendicolari all'asse di simmetria 15 di lunghezza W_p compresa tra $50\mu\text{m}$ e $500\mu\text{m}$, ad esempio di $400\mu\text{m}$, e spessore H_p compreso tra $3\mu\text{m}$ e $6\mu\text{m}$, ad esempio $4.8\mu\text{m}$. Le appendici 31 possono avere forma rettangolare con lati paralleli all'asse di simmetria 15 di lunghezza L_a coincidente con la lunghezza del lato della porzione principale 17 a cui sono solidali, ad esempio $L_a=L_p=200\mu\text{m}$, e lunghezza dei restanti lati pari ad esempio a $W_a=(1/3)L_a=66\mu\text{m}$ e spessore $H_a=(1/4)H_p=1.2\mu\text{m}$.

Un'applicazione preferita della microbilancia 30 riguarda la rilevazione e/o la misura della massa e del peso di molecole depositate al di sopra della microbilancia 30, ed in particolare al di sopra delle sole appendici 31. Alternativamente, la microbilancia 30 può essere utilizzata per la misura dinamica, in situ, dello spessore raggiunto da uno strato di materiale durante un processo di deposizione, ad esempio di tipo sputtering o per evaporazione.

Per la rilevazione e/o la misura di masse di molecole o porzioni di molecole organiche (ad esempio DNA, proteine, ecc.) e non organiche (ad esempio CO , NO_2 , ecc.) la

superficie del corpo mobile 11 e/o delle appendici 31 deve essere opportunamente trattata, ad esempio depositando uno strato di legame atto a favorire legami chimici e non chimici con molecole o porzioni di molecole, in modo da poter trattenere solo le molecole di interesse.

Per la rilevazione di specifiche sequenze di DNA (sequenze "target") è invece opportuno favorire l'adesione ("grafting") sul corpo mobile 11 e/o delle appendici 31 di sequenze di DNA complementari (sequenze "probe") alle sequenze target e quindi consentire l'ibridazione delle sequenze target con le sequenze probe.

Per la rilevazione di specifiche proteine è invece possibile funzionalizzare la superficie del corpo mobile 11 e/o delle appendici 31 mediante opportuni anticorpi atti a legarsi con le proteine da rilevare, o, in alternativa, è possibile formare strati auto assemblati (SAM, "Self Assembled Monolayers") chimicamente attivi, atti a formare un legame elettrostatico o covalente con le proteine di interesse.

Per la rilevazione di molecole inorganiche, lo strato di legame è, ad esempio, costituito da un polimero in grado di assorbire selettivamente le molecole di interesse. Per la rilevazione, ad esempio, di ottano, toluene e altri idrocarburi, è possibile utilizzare polimeri quali il polietere uretane (PEUT), il poliacrilammide (PAAM), il

polietilenglicoli PEG, il poli 4-stirene-sulfonato (PSS), il polivinil alcol (PVA), e altri ancora.

In uso, la microbilancia 30 viene convenientemente operata ad una propria frequenza di risonanza f_0 . Ad esempio, la microbilancia 30 può essere inserita in un anello di reazione di oscillatore (non mostrato) in modo che il segnale di uscita V_0 venga riportato, eventualmente amplificato, sulla porta di ingresso 22 (segnale di pilotaggio V_{in}), in modo da mantenere un'oscillazione alla frequenza di risonanza f_0 .

L'ibridazione delle sequenze target con le sequenze probe o la ritenzione da parte dello strato di legame o SAM di una quantità sufficiente di molecole inorganiche o organiche, causa un aumento della massa (e del peso) della microbilancia 30, e genera di conseguenza una variazione della frequenza di risonanza f_0 .

Poiché la variazione percentuale della frequenza di risonanza f_0 è indicativa della sensibilità di una microbilancia, data una certa massa addizionale sulla microbilancia 30 di molecole, porzioni di molecole o altro materiale depositato, la sensibilità della microbilancia 30 è tanto maggiore quanto più grande è il rapporto fra la massa addizionale totale e la massa della microbilancia 30 a riposo (cioè priva della massa addizionale). In strutture planari (aventi cioè spessore molto più piccolo della

larghezza e della lunghezza della struttura stessa), la sensibilità è inversamente proporzionale allo spessore della microbilancia 30. Lo spessore della microbilancia 30, ed in generale di gran parte delle strutture meccaniche risonanti analoghe, non può tuttavia essere ridotto al di sotto di un valore minimo necessario per integrare, nella microbilancia 30, elementi strutturali e/o gli avvolgimenti di attuazione e di rilevazione 20, 21.

Al contrario, le appendici 31, essendo esterne agli avvolgimenti di attuazione e rilevazione 20, 21, possono essere sottili quanto desiderato, nei limiti di spessore minimo dettati dalla solidità meccanica e del processo tecnologico utilizzato. Pertanto, in corrispondenza delle appendici 31, il rapporto fra la densità di massa addizionale totale per unità di superficie e la densità di massa per unità di superficie delle appendici 31 è massimo.

L'inerzia delle appendici 31 è dominante sull'inerzia della porzione principale 17 e quindi la loro ridotta densità di massa per unità di superficie risulta benefica per la sensibilità. Infatti il momento di inerzia della porzione principale 17, calcolato per una rotazione della porzione principale 17 attorno all'asse di simmetria 15, è dominato dal momento di inerzia delle appendici 31, in quanto la massa per unità di superficie viene matematicamente pesata per il quadrato della sua distanza

dall'asse di simmetria 15. Come conseguenza, regioni della porzione principale 17 e delle appendici 31 più lontane dall'asse di simmetria 15 più hanno un peso matematico maggiore rispetto a regioni vicine all'asse di simmetria 15.

La frequenza di risonanza f_0 della microbilancia 30 è fortemente influenzata dal momento di inerzia introdotto dalle appendici 31 e dunque in presenza di una massa addizionale sulle appendici 31, la frequenza di risonanza subisce una variazione percentuale maggiore rispetto alle forme di realizzazione di tipo noto prive di appendici 31.

Questo porta ad un considerevole vantaggio in termini di sensibilità della microbilancia 30. Ad esempio, con riferimento alla figura 4, formando appendici 31 rettangolari aventi dimensioni $L_a=L_p$, $W_a=(1/3)W_p$ e spessore $H_a=(1/4)H_p$, si ottiene un valore di sensibilità incrementata di circa due volte e mezzo rispetto al valore di sensibilità di microbilance 10 di tipo noto.

Per ottenere un incremento di sensibilità triplo è conveniente invece raggiungere un rapporto $W_a=(1/2)W_p$, mentre la lunghezza dei lati dell'apertura 16 è in questo caso la metà della lunghezza dei lati della porzione principale 17 a cui si affacciano. Comunque, con un'apertura 16 avente tali dimensioni o minori, l'aumento di sensibilità è indipendente sia dalle dimensioni

dell'apertura 16 stessa sia dalla lunghezza L_p della porzione principale 17. È inoltre opportuno specificare che i dati di incremento di sensibilità precedentemente indicati sono ottenuti considerando tutta la superficie della microbilancia 30 (dunque la superficie delle appendici 31 e la superficie della porzione principale 17) ricoperta da uno strato di legame.

Le figure 5-10 mostrano una sezione trasversale della microbilancia 30 lungo una linea di sezione V-V di figura 4, durante fasi di fabbricazione successive per realizzare la microbilancia 30.

Una fetta 34, comprendente un substrato 35 di silicio, viene sottoposta a fasi di "front end" standard.

Inizialmente, figura 5, viene deposto uno strato portante 36, ad esempio ossido di campo (FOX) e/o PMD con spessore di $1.2\mu\text{m}$, avente la funzione di definire una base di appoggio su cui realizzare gli avvolgimenti di attuazione 20 e rilevazione 21.

Quindi, figura 6, un primo strato metallico, ad esempio alluminio, viene deposto a formare il primo livello metallico e definito in modo da realizzare l'avvolgimento di rilevazione 21 e prime regioni di maschera 37, aventi, come meglio illustrato in seguito, la funzione di definire la forma delle appendici 31. Preferibilmente, l'avvolgimento di rilevazione 21 è formato da una linea

metallica che si avvolge al di sopra dello strato portante 36 a formare la pluralità di spire di rilevazione 21" concentriche (due spire nell'esempio mostrato in figura) e la seconda porzione di connessione 21' disposta sul secondo braccio 13.

Un primo strato intermetallico 39, di materiale dielettrico, viene deposto sulla fetta 34 per proteggere ed isolare le prime regioni di maschera 37 e l'avvolgimento di rilevazione 21 ed infine planarizzato.

In seguito, figura 7, al di sopra del primo strato intermetallico 39 viene deposto un secondo strato metallico, ad esempio alluminio, a formare il secondo livello metallico e definito per realizzare l'avvolgimento di attuazione 20 e la seconda porzione di connessione 21' disposta sul primo braccio 12.

L'avvolgimento di attuazione 20 comprende la spira di attuazione 20" (una singola spira nell'esempio mostrato in figura) e la prima porzione di connessione 20', disposta sul primo braccio 12. In questo caso, la spira di attuazione 20" ha una larghezza maggiore di una singola spira di rilevazione 21".

Un secondo strato intermetallico 41, di materiale dielettrico e più in particolare dello stesso materiale utilizzato per il primo strato intermetallico 39, viene deposto sulla fetta 34, per proteggere ed isolare

l'avvolgimento di attuazione 20 durante le successive fasi di fabbricazione. Il secondo strato intermetallico 41 viene quindi planarizzato.

Con riferimento congiunto alle figure 4 e 7, risulta chiaro che la porzione di connessione 21' dell'avvolgimento di rilevazione 21 disposta sul primo braccio 12 ed avente la funzione di connessione tra l'avvolgimento di rilevazione 21 e la porta di uscita 23, deve essere realizzata in un livello metallico diverso da quello in cui sono realizzate le spire di rilevazione 21", ad esempio, come descritto, può essere realizzata nello stesso livello metallico (secondo livello metallico) dell'avvolgimento di attuazione 20, per evitare di creare un contatto elettrico trasversale tra spire di rilevazione 21" concentriche.

A questo fine deve essere previsto, in modo non mostrato in figura, un contatto ("pad") di connessione tra le spire di rilevazione 21", realizzate nel primo livello metallico, e la porzione di connessione 21' realizzata nel secondo livello metallico.

In seguito, figura 8, al di sopra del secondo strato intermetallico 41, viene depositato un terzo strato metallico, ad esempio alluminio, a formare un terzo livello metallico, e definito per realizzare seconde regioni di maschera 42. Le seconde regioni di maschera 42 hanno la funzione, come meglio illustrato in seguito, di definire la forma del

corpo mobile 11 e del primo e secondo braccio 12, 13.

Quindi, uno strato di passivazione 43 (ad esempio nitruro) viene cresciuto sulla fetta 34, al di sopra del secondo strato intermetallico 41 e delle seconde regioni di maschera 42. Lo strato di passivazione 43 ha una funzione di protezione, durante la fabbricazione, dell'elettronica di pilotaggio e elaborazione (non mostrata) quando tale elettronica viene realizzata in modo integrato su una stessa piastrina ("chip") della microbilancia 30, contestualmente alle fasi di fabbricazione della microbilancia 30.

In seguito lo strato di passivazione 43 viene selettivamente rimosso dalla fetta 34 in modo da lasciare scoperte le seconde regioni di maschera 42 e il secondo strato intermetallico 41. Una successiva fase di attacco (figura 9), ad esempio di tipo umido ("wet etching") per 30 minuti utilizzando una soluzione BHF ("buffered hydrofluoric acid"), permette di rimuovere selettivamente il secondo strato intermetallico 41, il primo strato intermetallico 39 e lo strato portante 36 in regioni della fetta 34 non protette dallo strato di passivazione 43, dalle prime regioni di maschera 37 e dalle seconde regioni di maschera 42. Questa fase di fabbricazione è particolarmente critica poiché, data la natura isotropa dell'attacco umido con BHF, un'eccessiva rimozione laterale

(lungo una direzione parallela al substrato 35) del primo e del secondo strato intermetallico 39, 41 può portare all'esposizione parziale dell'avvolgimento di attuazione 20 e/o di rilevazione 21. Tale evento deve essere accuratamente evitato, in quanto successive fasi di fabbricazione potrebbero causare un danneggiamento delle zone degli avvolgimenti di attuazione 20 e rilevazione 21 esposte. Per ovviare a questo problema, è consigliabile realizzare gli avvolgimenti di attuazione 20 e rilevazione 21 ad una distanza di almeno 10 μm dai lati esterni previsti per la porzione principale 17 e dai lati interni alla porzione principale 17, previsti per delimitare l'apertura 16. A tal fine, le seconde regioni di maschera 42 sono realizzate al di sopra degli avvolgimenti di attuazione e rilevazione 20, 21 ed allineate ad essi, e si estendono lateralmente all'avvolgimento di attuazione 20 e/o all'avvolgimento di rilevazione 21 per una lunghezza di almeno 10 μm .

In alternativa è possibile utilizzare un attacco di tipo anisotropo (ad esempio un attacco DRIE, "Deep Reactive Ion Etching"), rendendo così meno stringenti gli accorgimenti di distanza laterale minima previsti per gli avvolgimenti di attuazione 20 e rilevazione 21.

Durante la fase di attacco umido con BHF, le prime regioni di maschera 37 proteggono la porzione di strato

portante 36 sottostante, impedendone la rimozione e definendo così la forma delle appendici 31, che sono realizzate in prolungamento dello strato portante 36 e ne posseggono le caratteristiche di spessore, rigidità, densità di massa, ecc. Analogamente, le seconde regioni di maschera 42 definiscono la forma del corpo mobile 11 e dell'apertura 16.

Infine, figura 10, le prime e le seconde regioni di maschera 37, 42 vengono rimosse, ad esempio mediante attacco umido utilizzando una soluzione composta da 71.6% di H_3PO_4 , 3.4% di CH_3COOH e 25% di acqua deionizzata, per un tempo di circa 10 minuti ad una temperatura di 40°C, in modo da esporre il corpo mobile 11 e le appendici 31.

L'apertura 16 è utilizzata per facilitare la rimozione, ad esempio mediante attacco umido con TMAH ("tetramethylammonium hydroxide") per un tempo di circa 165 minuti ad una temperatura di 80°C, del substrato 35 al di sotto della porzione principale 17 e del primo e secondo braccio 12, 13 della microbilancia 30, realizzando una struttura sospesa al di sopra di una cavità 45.

La figura 11 mostra una successiva fase di deposito e definizione di uno strato di legame 44, ad esempio uno strato polimerico (PEUT, PAAM, PEG, PMMA, ecc.), su una superficie superiore 31a delle appendici 31 (alternativamente, in modo non mostrato in figura, è

possibile depositare lo strato di legame 44 oltre che sulla superficie superiore 31a delle appendici 31 anche sull'intera superficie della porzione principale 17).

Questa fase di deposito può alternativamente essere sostituita da una fase di funzionalizzazione (non mostrata) della superficie superiore 31a delle appendici 31 con sequenze probe di DNA o anticorpi.

Secondo un'ulteriore forma di realizzazione (mostrata in figura 12), è possibile incrementare ulteriormente la sensibilità della microbilancia 30, realizzando la spira di attuazione 20" e le spire di rilevazione 21" sullo stesso livello metallico, riducendo così lo spessore della porzione principale 17.

La figura 12 mostra una vista dall'alto di una microbilancia 50 secondo tale ulteriore forma di realizzazione. Elementi analoghi alla microbilancia 10 di figura 2 e alla microbilancia 30 di figura 4 non sono ulteriormente descritti, e sono mostrati in figura 12 con gli stessi numeri di riferimento.

Poiché la spira di attuazione 20" e le spire rilevazione 21" sono realizzate sullo stesso livello metallico, la spira di attuazione 20" e le spire di rilevazione 21" non sono tra loro sovrapposte, ma sono affiancate. Di conseguenza, la prima porzione di connessione 20' dell'avvolgimento di attuazione 20 è

disposta interamente sul primo braccio 12 mentre la seconda porzione di connessione 21' dell'avvolgimento di rilevazione 21 è disposta interamente sul secondo braccio 13 della microbilancia 50. Inoltre, in questo caso sono presenti due aperture 16, ciascuna realizzata internamente al rispettivo avvolgimento di attuazione 20 e rilevazione 21.

Per evitare di creare un contatto elettrico diretto tra le spire concentriche dell'avvolgimento di attuazione 21, anche in questo caso è opportuno formare la seconda porzione di connessione 21' su due livelli metallici differenti. In questo modo solo il secondo braccio 13 possiede uno spessore elevato dovuto alla presenza di due livelli metallici, analogamente alla microbilancia 30 di figura 4, mentre la porzione principale 17 è più sottile (e in particolare comprende un livello metallico in meno).

Per uniformità strutturale può essere conveniente realizzare il primo braccio 12 dello stesso spessore del secondo braccio 13. In questo modo, si riducono possibili svantaggi quali l'aumento dei modi di risonanza della struttura (minore purezza spettrale dell'oscillazione prodotta inserendo la microbilancia 50 in un anello di reazione di un oscillatore), oppure la minore solidità meccanica che potrebbe essere causa della rottura del braccio con spessore minore.

Le fasi di fabbricazione della microbilancia 50 sono descritte con riferimento alle figure 13-16 in cui viene mostrata una vista in sezione lungo una sezione XIII-XIII di figura 12, alla figura 17 in cui viene mostrata una vista in sezione lungo una sezione XVII-XVII di figura 12 e alla figura 18 in cui viene mostrata una vista in sezione lungo una sezione XVIII-XVIII di figura 12.

Innanzitutto, figura 13, viene disposto il substrato 35 e depositato, sul substrato 35, lo strato portante 36 (analogamente a quanto descritto con riferimento alla figura 5). Quindi, viene deposto un primo strato metallico, ad esempio alluminio, a formare il primo livello metallico, e quindi definito in modo da realizzare l'avvolgimento di rilevazione 21, l'avvolgimento di attuazione 20 e le prime regioni di maschera 37.

In seguito, viene deposto il primo strato intermetallico 39, di materiale dielettrico, per proteggere ed isolare le prime regioni di maschera 37, l'avvolgimento di attuazione 20 e l'avvolgimento di rilevazione 21.

Quindi, figura 14, al di sopra del primo strato intermetallico 39, viene deposto un secondo strato metallico, ad esempio alluminio, a formare un secondo livello metallico, e definito per realizzare le seconde regioni di maschera 42 e la porzione di connessione 21' dell'avvolgimento di rilevazione 21 che transita sul

secondo livello metallico (la porzione di connessione 21' formata su due livelli metallici è mostrata in sezione in figura 18). In questa fase, le seconde regioni di maschera 42 definiscono esclusivamente la forma della porzione principale 17 e non quella del primo e del secondo braccio 12, 13.

Successivamente viene depositato, al di sopra delle regioni di maschera 42 e della porzione di connessione 21', il secondo strato intermetallico 41. Una successiva deposizione e definizione di un terzo strato metallico (terzo livello metallico), al di sopra del secondo strato intermetallico 41, realizza terze regioni di maschera 46 per definire la forma del primo e del secondo braccio 12, 13 (poiché le terze regioni di maschera 46 non fanno parte della linea di sezione XIII-XIII, esse sono mostrate al fine di maggior chiarezza in figura 14 ma non sono mostrate nelle seguenti figure 15-17).

Una successiva fase di attacco umido (figura 15) permette di rimuovere il secondo strato intermetallico 41, il primo strato intermetallico 39 e lo strato portante 36 in porzioni non protette dalle prime, seconde e terze regioni di maschera 37, 42, 46.

Infine, figura 16, le prime, seconde e terze regioni di maschera 37, 42, 46 vengono rimosse e il substrato 35 al di sotto della porzione principale 17 e del primo e secondo

braccio 12, 13 della microbilancia 50 viene scavato, ad esempio con TMAH, realizzando una struttura sospesa al di sopra della cavità 45.

Le figure 17 e 18 mostrano una vista in sezione della microbilancia 50 al termine delle fasi di processo descritte con riferimento alle figure 13-16, lungo le rispettive linee di sezione XVII-XVII e XVIII-XVIII di figura 12.

È possibile prevedere, qualora necessario, una successiva fase di deposizione di uno strato di legame (non mostrato) sopra le appendici 31 e/o sopra il corpo mobile 11 o, alternativamente, la funzionalizzazione della superficie delle appendici 31 e/o del corpo mobile 11.

La figura 19 mostra una microbilancia 60 secondo un'ulteriore forma di realizzazione.

La microbilancia 60 differisce dalla microbilancia 50 di figura 12 in quanto non comprende le appendici 31. Il processo di fabbricazione è analogo a quanto illustrato con riferimento alla microbilancia 50, ma non comprende la fase di realizzazione delle appendici 31 (e quindi della prima regione di maschera 37). Questa forma di realizzazione è particolarmente vantaggiosa nel caso in cui si voglia minimizzare lo spazio occupato dalla microbilancia 60 e/o semplificare il processo di fabbricazione mantenendo comunque una sensibilità incrementata rispetto alla

microbilancia 10 di figura 2.

La figura 20 mostra una forma di realizzazione di un sistema di comando e lettura 70 per la microbilancia 30, 50 o 60.

Il sistema 70 include l'elettronica di pilotaggio 4, ad esempio comprendente un generatore di segnale 71, per generare il segnale di pilotaggio V_{in} di attuazione della microbilancia 30, 50 o 60 ed eventualmente segnali di comando S_{m1} , S_{m2} per abilitare la generazione del campo magnetico da parte dei magneti 25 (ad esempio, i magneti 25 possono essere realizzati per mezzo di elettromagneti); l'elettronica di elaborazione 5, comprendente un amplificatore di uscita 72 e un circuito di elaborazione e/o analisi 76; e, opzionalmente, un anello di reazione di oscillatore 77, per riportare il segnale di uscita V_o sulla porta di ingresso 22 della microbilancia 30, 50, 60.

Vantaggiosamente, l'elettronica di pilotaggio 4, di elaborazione 5 e l'anello di reazione di oscillatore 77 possono essere integrati su uno stesso chip 78 insieme alla microbilancia 30, 50, 60.

Inoltre, tramite un bus di sistema 74, è possibile collegare l'elettronica di pilotaggio 4 e di elaborazione 5 ad un computer 73, avente la funzione di ausilio alla generazione del segnale di pilotaggio V_{in} e ausilio all'elaborazione e analisi del segnale di uscita V_o per la

valutazione di un'eventuale variazione della frequenza di risonanza f_0 .

Le forme di realizzazione della presente invenzione descritte presentano numerosi vantaggi.

Ad esempio, per quanto riguarda la microbilancia 30 e la microbilancia 50, mostrate rispettivamente nelle figure 12 e 19, e presentanti gli avvolgimenti di attuazione e rilevazione 20, 21 affiancati, la mutua induttanza fra avvolgimento di attuazione 20 e rilevazione 21 risulta notevolmente ridotta. La riduzione della mutua induttanza genera inoltre una riduzione del segnale parassita che altrimenti si sovrapporrebbe al segnale utile, degradandolo. In uso, infatti, il segnale parassita deve essere molto più piccolo del segnale utile generato quando la microbilancia è in risonanza.

Inoltre, realizzando gli avvolgimenti di attuazione e rilevazione 20, 21 affiancati, è possibile ridurre le dimensioni della microbilancia senza deteriorare le performance. Considerando un'induttanza planare, la mutua induttanza è infatti, in prima approssimazione, meno che proporzionale ad un fattore di accoppiamento (dipendente, tra l'altro, dalla disposizione relativa degli avvolgimenti di attuazione e rilevazione 20, 21) moltiplicato per la media geometrica delle aree occupate dagli avvolgimenti di attuazione e rilevazione 20, 21 (i.e., il loro prodotto

sotto radice), mentre il segnale utile è proporzionale al quadrato dell'area occupata dall'avvolgimento di rilevazione 21. D'altra parte, il segnale utile è proporzionale al prodotto delle aree occupate dagli avvolgimenti di attuazione e rilevazione 20, 21. Quindi, per una certa area del corpo mobile 11 minima (e di conseguenza un'area minima occupata dagli avvolgimenti di attuazione e rilevazione 20, 21), il segnale utile sarà inferiore a quello parassita. Disponendo gli avvolgimenti di attuazione e rilevazione 20, 21 affiancati tra loro e non sovrapposti (secondo le forme di realizzazione delle microbilance 50 e 60), si può ridurre notevolmente il fattore di accoppiamento, e quindi ridurre l'area del corpo mobile 11 mantenendo un livello di segnale utile accettabile.

La figura 21 mostra curve di guadagno di sensibilità al variare del rapporto tra la lunghezza W_a del lato delle appendici 31 ortogonale all'asse di simmetria 15 e la lunghezza W_p del lato della porzione principale 17 ortogonale all'asse di simmetria 15, per differenti rapporti tra lo spessore H_p della porzione principale 17 e lo spessore H_a delle appendici 31 (rispettivamente, per valori H_p/H_a pari a 2, 4, 6 e 8).

Le curve di sensibilità sono rappresentate su un sistema di assi cartesiani in cui l'ascissa rappresenta il

rapporto W_a/W_p , mentre l'ordinata rappresenta il valore di guadagno di sensibilità.

Si può notare che, aumentando il rapporto H_p/H_a (dunque riducendo lo spessore H_a delle appendici 31), la sensibilità aumenta.

Risulta infine chiaro che alla microbilancia 30, 50 o 60 qui descritta ed illustrata possono essere apportate modifiche e varianti senza per questo uscire dall'ambito protettivo della presente invenzione, come definito nelle rivendicazioni allegate.

Ad esempio, l'avvolgimento di attuazione 20 e l'avvolgimento di rilevazione 21 possono comprendere, indipendentemente, un numero maggiore o minore di spire, e possono essere realizzati su livelli metallici differenti da quelli descritti. Poiché riducendo le dimensioni degli avvolgimenti di attuazione 20 e rilevazione 21 il segnale utile peggiora, è possibile realizzare una pluralità di avvolgimenti di attuazione 20 e/o una pluralità di avvolgimenti di rilevazione 21 in livelli metallici differenti sovrapposti, per incrementare l'efficacia dell'attuazione e/o della rilevazione.

Inoltre, è possibile implementare altre tipologie di attuazione e rilevazione, alternative all'attuazione e alla rilevazione di tipo magnetico.

Ad esempio, i trasduttori di attuazione e rilevazione

possono essere di tipo piezoelettrico. In questo caso non è necessario predisporre nella microbilancia gli avvolgimenti di attuazione e rilevazione tipici dell'attuazione e della rilevazione di tipo magnetico. È invece opportuno prevedere fasi di deposizione o impianto di uno strato di materiale piezoelettrico, per realizzare i trasduttori di attuazione. I trasduttori di rilevazione potrebbero inoltre essere realizzati di materiale piezoresistivo; in questo caso è necessario prevedere durante le fasi di fabbricazione il deposito di uno strato piezoresistivo.

Alternativamente, i trasduttori di attuazione e rilevazione possono essere di tipo termico, termomeccanico o capacitivo. In qualsiasi caso, risulta vantaggiosa l'introduzione delle appendici 31 al di fuori della zona in cui sono formati i trasduttori di attuazione e rilevazione.

Infine, le figure 22a-22c mostrano, in vista dall'alto, forme di realizzazione alternative per le appendici 31. Nelle figure 22a-22c il corpo mobile 11 ed il primo e secondo braccio 12, 13 della microbilancia sono schematicamente rappresentati privi degli avvolgimenti di attuazione 20 e rilevazione 21, in quanto è possibile prevedere appendici 31 per qualsiasi tipo di microbilancia, indipendentemente dal metodo di attuazione e rilevazione utilizzato.

La forma delle appendici 31 può essere ottimizzata

introducendo fori 80 o sagomando le appendici 31 in modo da ridurre lo smorzamento dovuto all'aria, aumentando il fattore di qualità Q del dispositivo. Il fattore di qualità Q è una misura della selettività in frequenza della microbilancia. Quanto più elevato è il valore del fattore di qualità Q , tanto più sono attenuate le componenti del segnale di pilotaggio V_{in} a frequenza diversa dalla frequenza di risonanza. Di conseguenza, un alto fattore di qualità Q è indicativo di una forte riduzione del rumore introdotto dal segnale di pilotaggio V_{in} , che può contenere jitter e variazioni casuali di frequenza. Il rumore potrebbe infatti causare variazioni della frequenza di oscillazione confondibili con le variazioni di frequenza di oscillazione dovute ad variazione di massa del dispositivo. In conclusione un alto fattore di qualità Q è indicativo della capacità di distinguere variazioni minime della frequenza di risonanza e quindi di un'alta risoluzione della microbilancia.

Le figure 22a e 22b mostrano due differenti forme di realizzazione delle appendici 31 comprendenti uno (figura 22a) o più (figura 22b) fori 80 utilizzati per aumentare il rapporto fra la superficie ed il volume delle appendici 31. In questo modo, si può ottenere un aumento di sensibilità in funzione dello strato di legame 44 utilizzato.

Se alternativamente allo strato di legame 44 vengono

utilizzate sequenze probe di DNA, anche le pareti laterali dei fori 80 possono essere funzionalizzate, aumentando la densità di siti di reazione per unità di superficie e quindi la probabilità di ibridazione con sequenze target.

Se invece come strato di legame 44 è utilizzato un polimero in grado di catturare molecole inorganiche e se tale polimero, dopo essere stato depositato, copre i fori 80, l'ala 31 forata e ricoperta da polimero risulta comunque avere una densità di massa per unità di superficie minore rispetto ad un'ala 31 priva di fori 80, mentre la densità di siti di assorbimento per unità di superficie risulta la stessa, con conseguente aumento di sensibilità. Per massimizzare il vantaggio, è comunque consigliabile utilizzare un polimero con densità di massa quanto più minore possibile rispetto alla densità di massa del materiale utilizzato per la fabbricazione delle appendici 31.

La figura 22b mostra un'ulteriore forma di realizzazione delle appendici 31. In questo caso le appendici 31 sono prive di fori ma sono sagomate con una forma a T.

Risulta chiaro che le appendici 31 possono avere una forma qualsiasi, e possono comprendere un numero qualsiasi di fori 80, aventi anch'essi una forma qualsiasi.

Risulta inoltre chiaro che anche la porzione

principale 17 può avere forma qualsiasi, anche circolare. In questo caso le appendici 31 avranno forma opportuna, ad esempio a lunetta o a spicchio, come mostrato in figura 23.

Infine, come mostrato in figura 24, indipendentemente dalla forma della porzione principale 17, la microbilancia può essere sostenuta da un singolo braccio (ad esempio solo il primo braccio 12). In questo caso il movimento del singolo braccio può essere sia di tipo torsionale che flessionale. Può inoltre essere prevista una sola appendice 31, realizzata ad esempio su un lato porzione principale 17 opposto al singolo braccio.

RIVENDICAZIONI

1. Microbilancia MEMS comprendente:

un substrato di materiale semiconduttore avente una cavità;

un risuonatore sospeso al di sopra della cavità del substrato e includente:

- un corpo mobile;
- almeno un primo braccio collegato fra il substrato e il corpo mobile, avente un primo spessore ed atto a consentire oscillazioni del corpo mobile rispetto al substrato;
- un trasduttore di attuazione collegato al corpo mobile e atto a generare dette oscillazioni ad una frequenza di risonanza;
- un trasduttore di rilevazione atto a rilevare una variazione della frequenza di risonanza,

in cui il corpo mobile comprende almeno una porzione sottile avente un secondo spessore inferiore a detto primo spessore del primo braccio.

2. Microbilancia secondo la rivendicazione 1, in cui il corpo mobile comprende una porzione principale e detta porzione sottile comprende almeno una prima appendice estendentesi lateralmente da detta porzione principale.

3. Microbilancia secondo la rivendicazione 2, in cui la porzione principale ha detto primo spessore.

4. Microbilancia secondo la rivendicazione 2 o 3, comprendente inoltre un secondo braccio estendentesi fra detta porzione principale e detto substrato, ed una seconda appendice, detti primo e secondo braccio delimitando una prima ed una seconda superficie laterale, fra loro opposte, di detta porzione principale; dette prima e seconda appendice estendendosi da detta prima, rispettivamente detta seconda superficie laterale.

5. Microbilancia secondo la rivendicazione 4, in cui dette prima e seconda appendice hanno forma scelta fra rettangolare, quadrata, lunetta e forma a T.

6. Microbilancia secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 2-5, in cui detta prima appendice comprende uno o più fori (80).

7. Microbilancia secondo la rivendicazione 1, in cui detta porzione principale è costituita da detta porzione sottile e ha detto secondo spessore.

8. Microbilancia secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente uno strato di legame disposto al di sopra di detta porzione sottile e/o al di sopra di detta porzione principale ed atto a formare un legame con molecole o porzioni di molecole.

9. Microbilancia secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detto risuonatore è di tipo magnetico-induttivo, il trasduttore di attuazione

comprende almeno un avvolgimento di attuazione realizzato nel corpo mobile in un rispettivo livello metallico, ed in cui il trasduttore di rilevazione comprende almeno un avvolgimento di rilevazione realizzato nel corpo principale in un rispettivo livello metallico.

10. Microbilancia secondo la rivendicazione 9, comprendente inoltre un secondo braccio estendentesi fra detto corpo mobile e detto substrato, in cui l'avvolgimento di attuazione comprende almeno una spira di attuazione di materiale conduttivo e prime porzioni di connessione, e l'avvolgimento di rilevazione comprende almeno una spira di rilevazione di materiale conduttivo e seconde porzioni di connessione, dette prime e seconde porzioni di connessione estendendosi lungo detti primo e secondo braccio, dette prime porzioni di connessione formando una porta di ingresso dell'avvolgimento di attuazione e dette seconde porzioni di connessione formando una porta di uscita dell'avvolgimento di rilevazione.

11. Microbilancia secondo la rivendicazione 10, in cui detta spira di attuazione e detta spira di rilevazione sono formate su livelli metallici differenti, e sono parzialmente sovrapposte.

12. Microbilancia secondo la rivendicazione 10, in cui detta spira di attuazione e detta spira di rilevazione sono formate su uno stesso livello metallico e sono tra loro

eletttricamente isolate.

13. Sistema comprendente:

una interfaccia;

una microbilancia secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1-12;

un generatore di campo magnetico, atto a generare un campo magnetico accoppiato al trasduttore di attuazione e al trasduttore di rilevazione;

un generatore di segnale accoppiato al trasduttore di attuazione, per generare un segnale di comando della microbilancia; e

una unità di elaborazione, per elaborare il segnale di uscita del trasduttore di rilevazione.

14. Processo di fabbricazione di una microbilancia MEMS, comprendente le fasi di:

disporre un substrato di materiale semiconduttore;

formare un risuonatore sospeso al di sopra del substrato e includente:

- formare un corpo mobile;

- formare almeno un primo braccio collegato fra il substrato e il corpo, avente un primo spessore ed atto a consentire oscillazioni del corpo mobile rispetto al substrato;

- formare un trasduttore di attuazione collegato al corpo e atto a generare dette oscillazioni ad una

frequenza di risonanza;

- formare un trasduttore di rilevazione atto a rilevare una variazione della frequenza di risonanza, in cui la fase di formare il corpo comprende formare almeno una porzione sottile avente un secondo spessore inferiore a detto primo spessore del primo braccio.

15. Processo di fabbricazione secondo la rivendicazione 14, in cui le fasi di formare un corpo mobile, un primo braccio e almeno una porzione sottile comprendono:

formare uno strato strutturale al di sopra del substrato;

rimuovere selettivamente lo strato strutturale in modo da definire contemporaneamente il corpo mobile, il primo braccio e la porzione sottile;

scavare detto substrato al di sotto di detto corpo mobile e di detto primo braccio in modo da formare una cavità.

16. Processo di fabbricazione secondo la rivendicazione 15, comprendente inoltre la fase di formare uno strato di legame al di sopra dello strato strutturale, detto strato di legame essendo di materiale atto a creare un legame con molecole o porzioni di molecole.

17. Processo di fabbricazione secondo la rivendicazione 15 o 16, in cui detta fase di formare uno

strato strutturale comprende:

formare uno strato portante;

formare i trasduttori di attuazione e di rilevazione al di sopra di detto strato portante;

formare un primo strato protettivo al di sopra di detti trasduttori di attuazione e di rilevazione;

formare prime regioni di mascheramento al di sopra di detto primo strato protettivo;

formare un secondo strato protettivo al di sopra di dette prime regioni di mascheramento;

rimuovere selettivamente detto secondo strato protettivo, detto primo strato protettivo e detto strato portante in modo da definire detto corpo mobile.

18. Processo di fabbricazione secondo la rivendicazione 17, in cui la fase di formare i trasduttori di attuazione e di rilevazione comprende

depositare un primo livello metallico e definire detto primo livello metallico in modo da formare spire di attuazione e spire di rilevamento complanari; e

depositare un secondo livello metallico, al di sopra di detto primo livello metallico, e definire detto secondo livello metallico in modo da formare una porzione di connessione di dette spire di attuazione o di dette spire di rilevazione almeno parzialmente in detto secondo livello metallico.

19. Processo di fabbricazione secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 17, 18, comprendente inoltre la fase di formare seconde regioni di mascheramento al di sopra di detto secondo strato protettivo, ed in cui la fase di rimuovere selettivamente detto secondo strato protettivo, detto primo strato protettivo e detto strato portante consente inoltre di definire detto primo braccio.

20. Processo di fabbricazione secondo la rivendicazione 17, in cui la fase di formare i trasduttori di attuazione e di rilevazione comprende depositare un primo livello metallico, definire detto primo livello metallico in modo da formare prime spire, depositare un terzo strato protettivo, depositare un secondo livello metallico, definire detto secondo livello metallico in modo da formare seconde spire, sovrapposte a dette prime spire.

21. Processo di fabbricazione secondo la rivendicazione 17, in cui la fase di formare i trasduttori di attuazione e di rilevazione comprende depositare un primo livello metallico e definire detto primo livello metallico, la fase di definire il primo livello metallico comprendendo formare terze regioni di mascheramento sovrapposte a detto strato portante e detta fase di rimuovere selettivamente comprende definire una porzione principale di detto corpo mobile al di sotto di dette prime regioni di mascheramento e appendici laterali al di sotto

di dette terze regioni di mascheramento, dette appendici laterali essendo di spessore inferiore a detta porzione principale.

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

Elena CERBARO

CLAIMS

1. A MEMS microbalance comprising:

a substrate made of semiconductor material having a cavity;
and

a resonator suspended above the cavity of the substrate and
including:

- a mobile body;
- at least a first arm, connected between the substrate and the mobile body, having a first thickness and designed to enable oscillations of the mobile body with respect to the substrate;
- an actuation transducer connected to the mobile body and designed to generate said oscillations at a resonance frequency; and
- a detection transducer designed to detect a variation in the resonance frequency,

wherein the mobile body comprises at least a thin portion having a second thickness smaller than said first thickness of the first arm.

2. The microbalance according to Claim 1, wherein the mobile body comprises a main portion and said thin portion comprises at least one first appendage extending laterally from said main portion.

3. The microbalance according to Claim 2, wherein the main portion has said first thickness.

4. The microbalance according to Claim 2 or Claim 3, moreover comprising a second arm extending between said main portion and said substrate, and a second appendage, said first and second arms delimiting a first lateral surface and a second lateral surface, opposite to one another, of said main portion; said first appendage and said second appendage extending from said first lateral surface and said second lateral surface, respectively.

5. The microbalance according to Claim 4, wherein said first and second appendages have a shape chosen from among rectangular, square, crescent-shape, and T-shape.

6. The microbalance according to any one of Claims 2-5, wherein said first appendage comprises one or more holes (80).

7. The microbalance according to Claim 1, wherein said main portion is constituted by said thin portion and has said second thickness.

8. The microbalance according to any one of the preceding claims, comprising a bond layer deposited on said thin portion and/or on said main portion and designed to form a bond with molecules or portions of molecules.

9. The microbalance according to any one of the preceding claims, wherein said resonator is of a magnetic-inductive type, wherein the actuation transducer comprises at least one actuation winding provided in the mobile body in a

respective metal level, and wherein the detection transducer comprises at least one detection winding provided in the main body in a respective metal level.

10. The microbalance according to Claim 9, moreover comprising a second arm extending between said mobile body and said substrate, wherein the actuation winding comprises at least one actuation loop made of conductive material and first connection portions, and the detection winding comprises at least one detection loop made of conductive material and second connection portions, said first and second connection portions extending along said first and second arms, said first connection portions forming an input port of the actuation winding and said second connection portions forming an output port of the detection winding.

11. The microbalance according to Claim 10, wherein said actuation loop and said detection loop are formed on different metal levels, and are partially set on top of one another.

12. The microbalance according to Claim 10, wherein said actuation loop and said detection loop are formed on one and the same metal level and are electrically insulated from one another.

13. A system comprising:
an interface;

a microbalance according to any one of Claims 1-12;
a generator of magnetic field, designed to generate a magnetic field coupled to the actuation transducer and to the detection transducer;
a signal generator coupled to the actuation transducer, for generating a signal for controlling the microbalance; and
a processing unit, for processing the output signal of the detection transducer.

14. A process of fabrication of a MEMS microbalance, comprising the steps of:

laying a substrate of semiconductor material;

forming a resonator suspended above the substrate and including:

- forming a mobile body;
- forming at least one first arm connected between the substrate and the body, having a first thickness and designed to enable oscillations of the mobile body with respect to the substrate;
- forming an actuation transducer connected to the body and designed to generate said oscillations at a resonance frequency; and
- forming a detection transducer designed to detect a variation of the resonance frequency,

wherein the step of forming the body comprises forming at least one thin portion having a second thickness smaller

than said first thickness of the first arm.

15. The fabrication process according to Claim 14, wherein the steps of forming a mobile body, a first arm and at least one thin portion comprise:

forming a structural layer on the substrate;

selectively removing the structural layer so as to define simultaneously the mobile body, the first arm, and the thin portion; and

digging said substrate underneath said mobile body and underneath said first arm so as to form a cavity.

16. The fabrication process according to Claim 15, moreover comprising the step of forming a bond layer on the structural layer, said bond layer being made of material designed to create a bond with molecules or portions of molecules.

17. The fabrication process according to Claim 15 or Claim 16, wherein said step of forming a structural layer comprises:

forming a bearing layer;

forming the actuation and detection transducers on said bearing layer;

forming a first protective layer on said actuation and detection transducers;

forming first mask regions on said first protective layer;

forming a second protective layer on said first mask

regions; and

selectively removing said second protective layer, said first protective layer, and said bearing layer so as to define said mobile body.

18. The fabrication process according to Claim 17, wherein the step of forming the actuation and detection transducers comprises:

depositing a first metal level and defining said first metal level so as to form actuation loops and co-planar detection loops; and

depositing a second metal level, on said first metal level, and defining said second metal level so as to form a portion of connection of said actuation loops or said detection loops at least partially in said second metal level.

19. The fabrication process according to either Claim 17 or Claim 18, moreover comprising the step of forming second mask regions on said second protective layer, and wherein the step of selectively removing said second protective layer, said first protective layer, and said bearing layer moreover enables definition of said first arm.

20. The fabrication process according to Claim 17, wherein the step of forming the actuation and detection transducers comprises depositing a first metal level, defining said first metal level so as to form first loops, depositing a

third protective layer, depositing a second metal level, defining said second metal level so as to form second loops, set on top of said first loops.

21. The fabrication process according to Claim 17, wherein the step of forming the actuation and detection transducers comprises depositing a first metal level and defining said first metal level, the step of defining the first metal level comprising forming third mask regions set on top of said bearing layer, and wherein said step of selective removal comprises defining a main portion of said mobile body underneath said first mask regions and side appendages underneath said third mask regions, said side appendages being of a thickness smaller than that of said main portion.

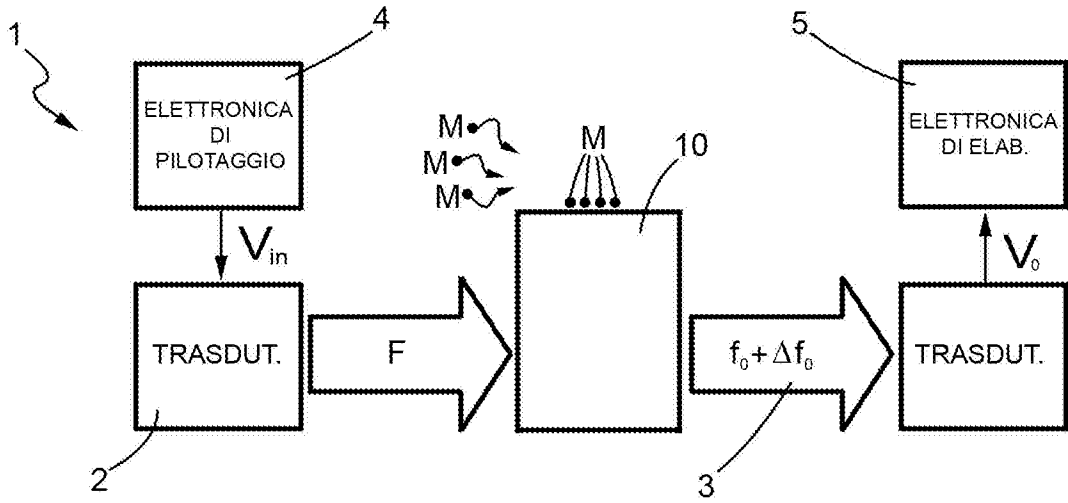


FIG. 1

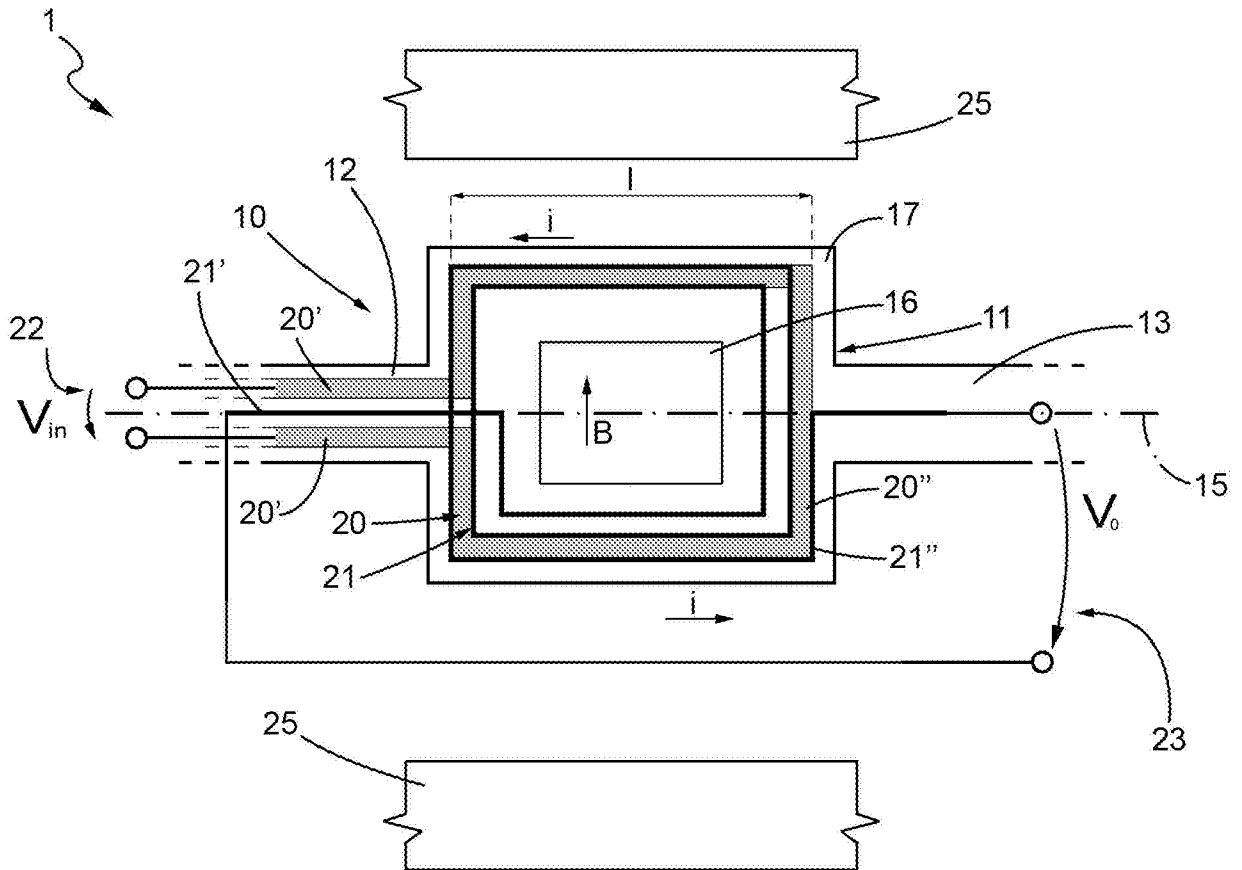


FIG. 2

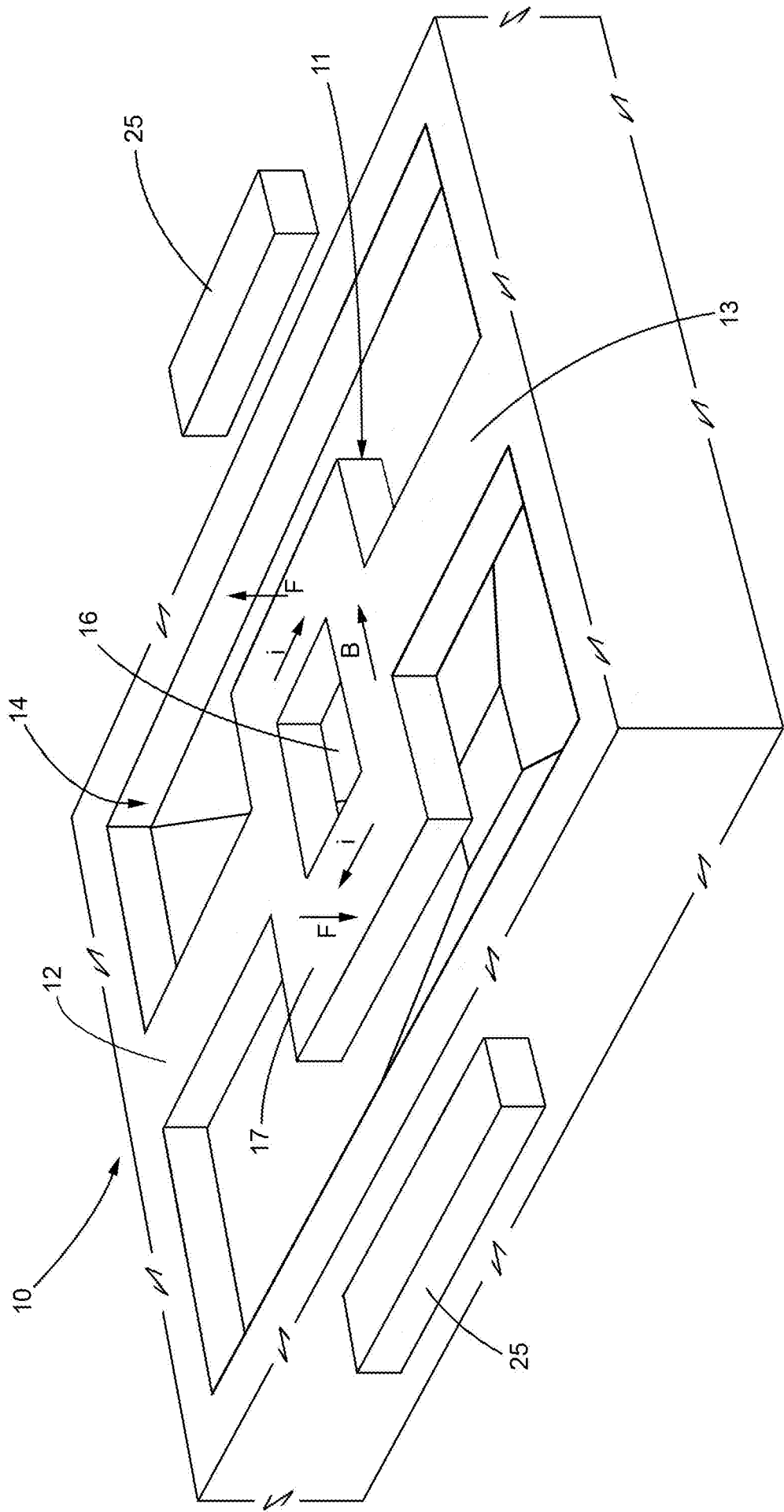


FIG. 3

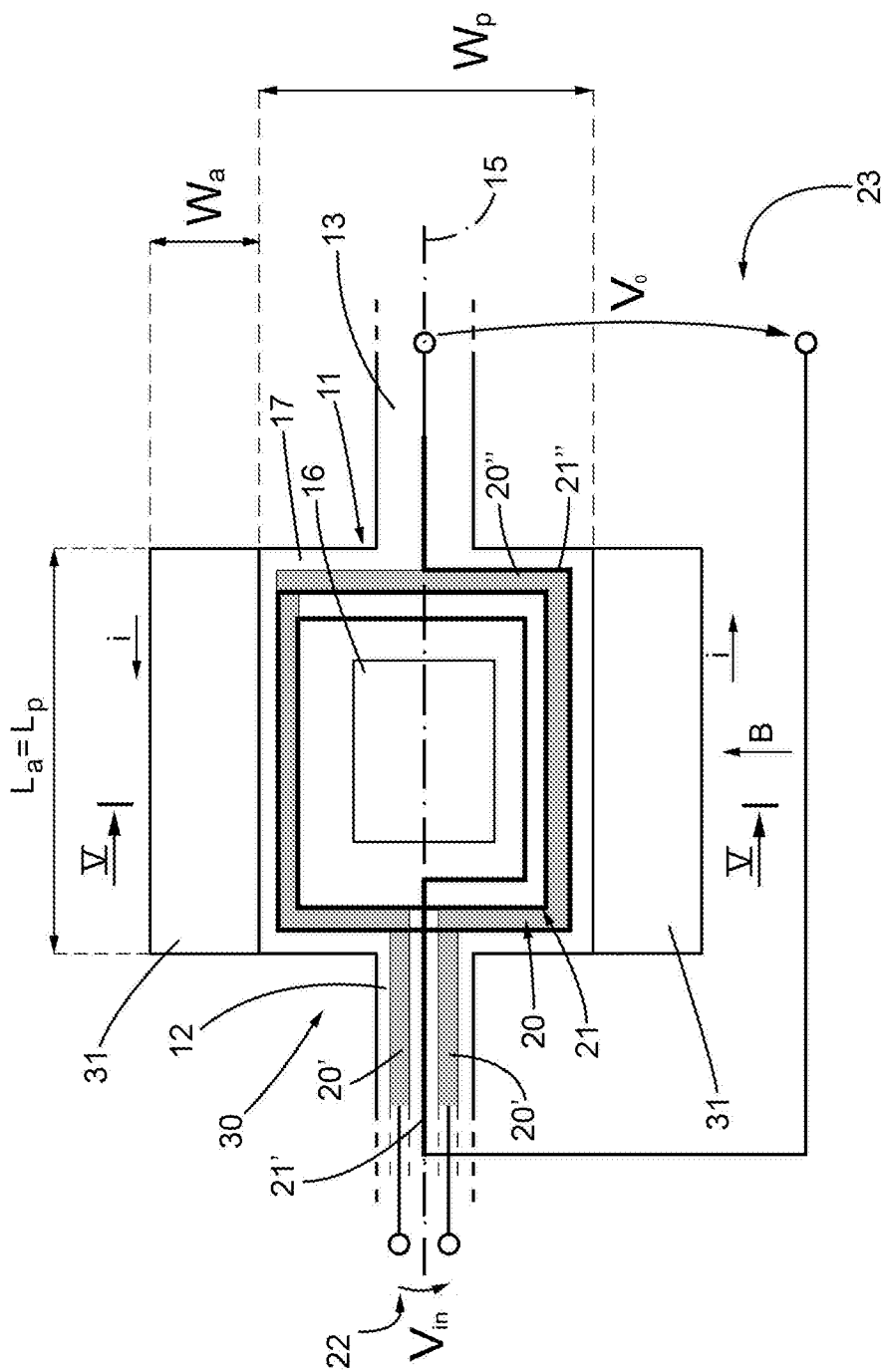


FIG. 4

FIG. 5

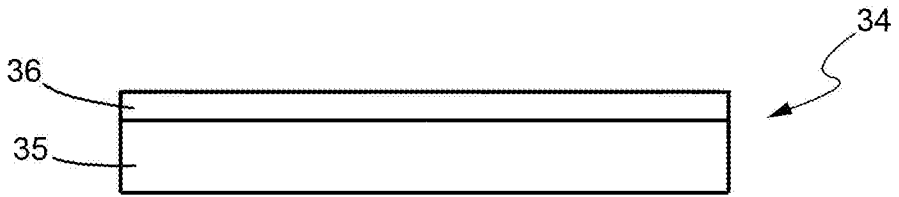


FIG. 6

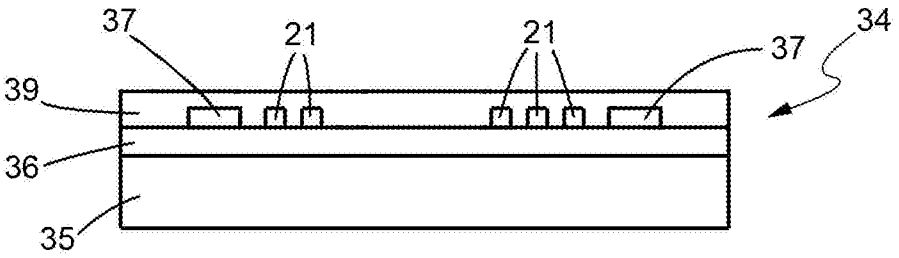


FIG. 7

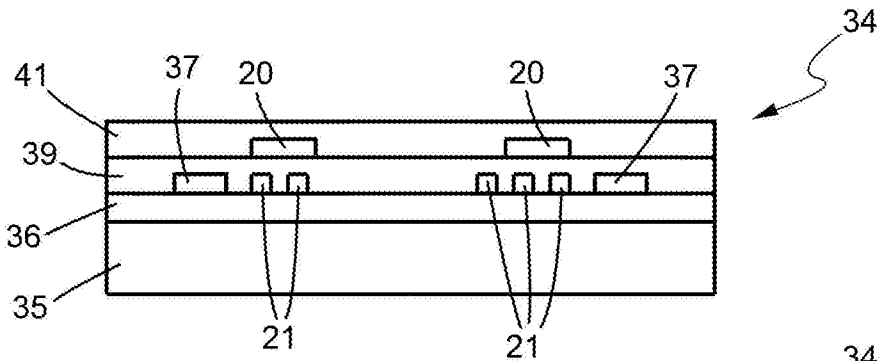


FIG. 8

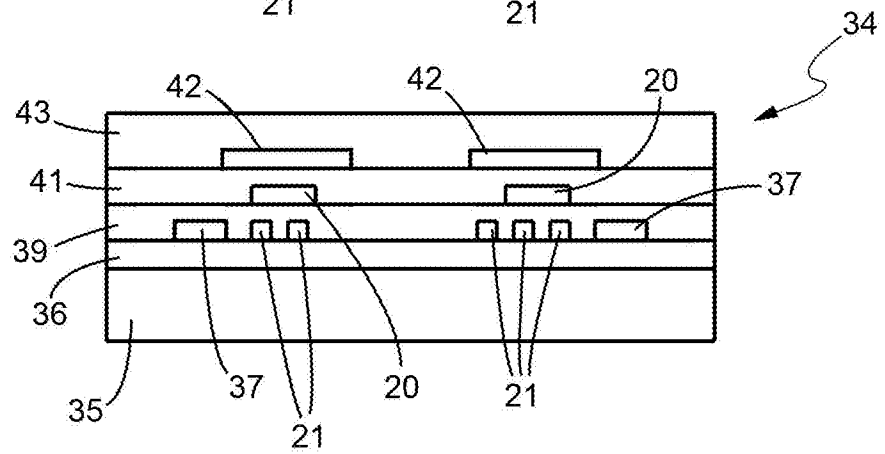
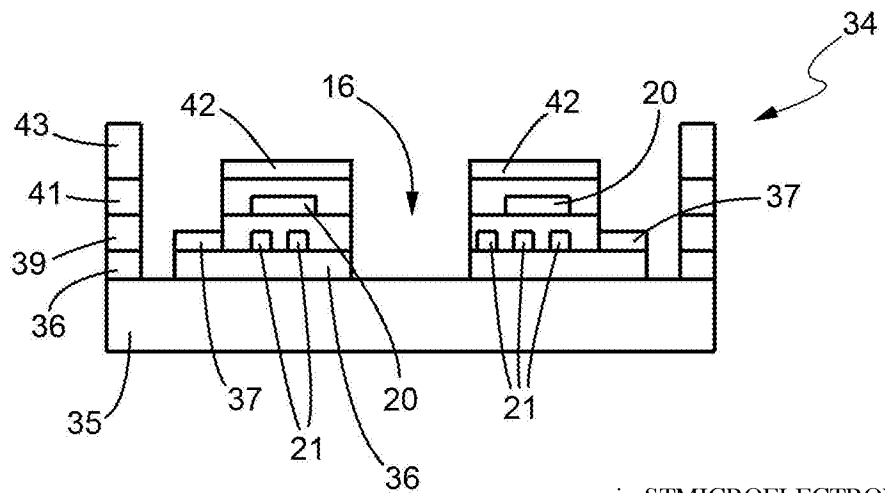


FIG. 9



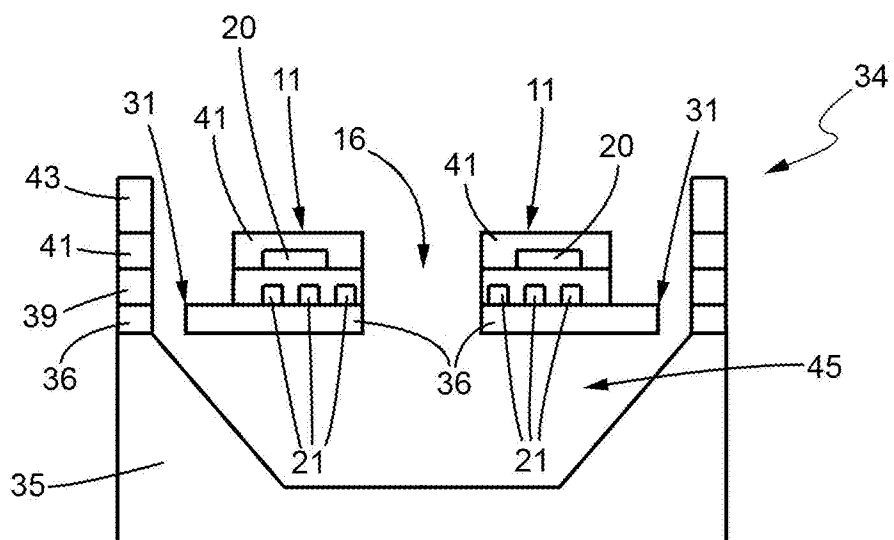


FIG. 10

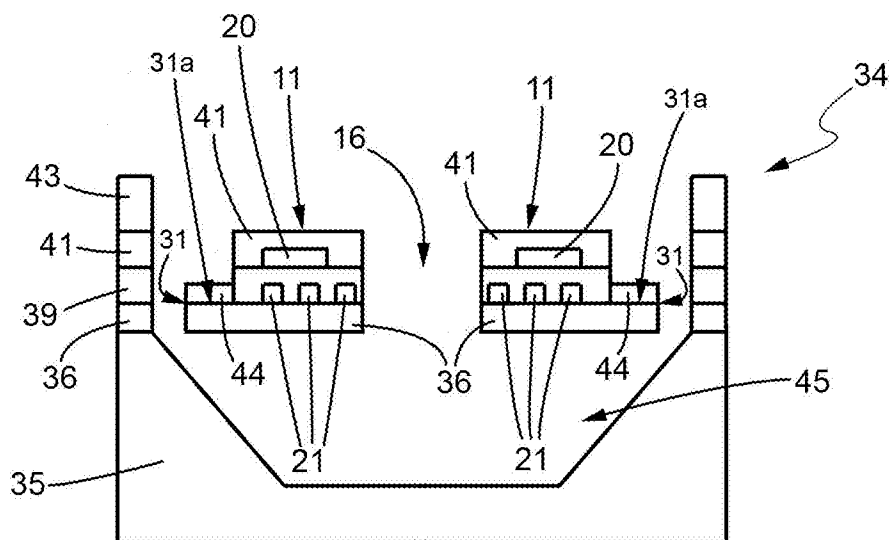


FIG. 11

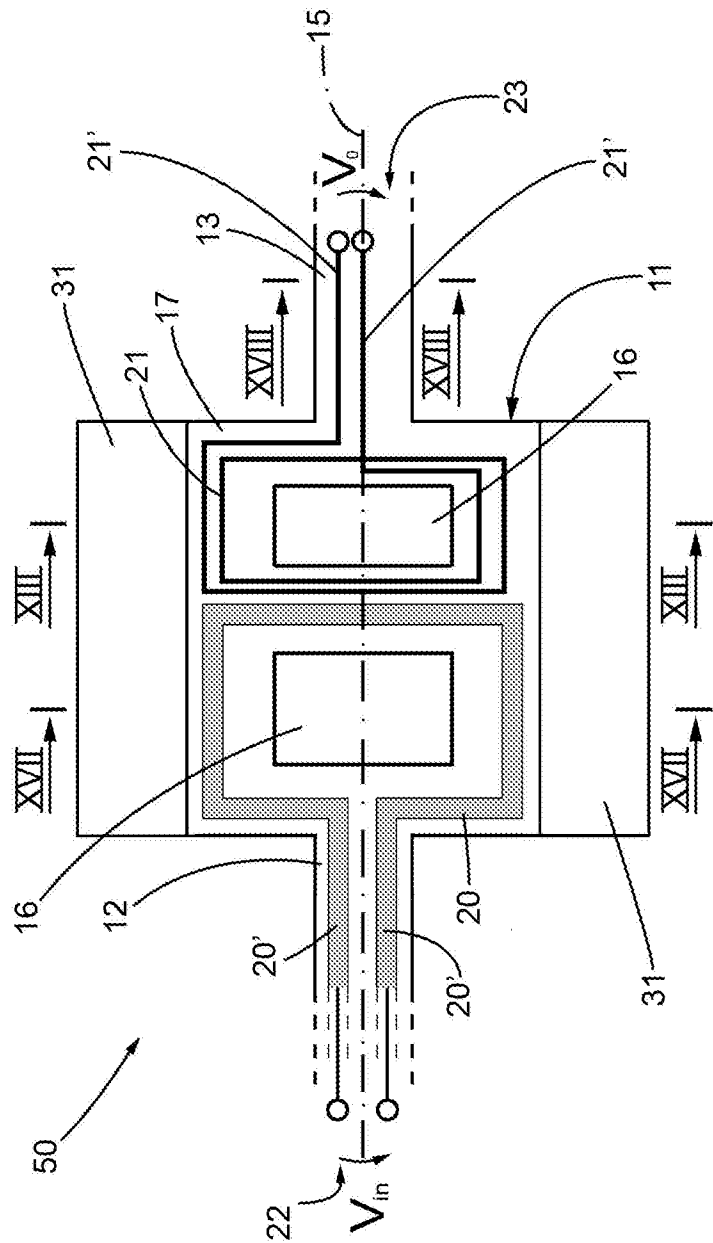


FIG. 12

FIG. 13

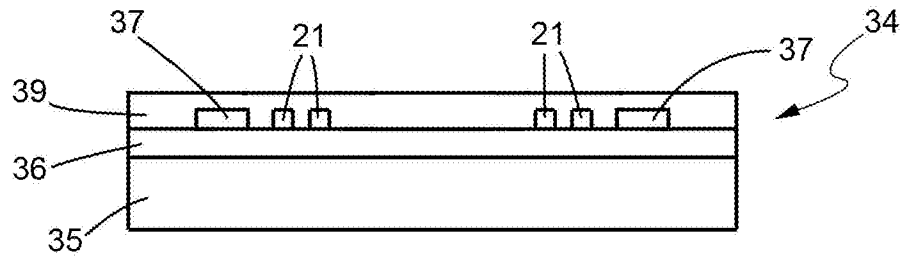


FIG. 14

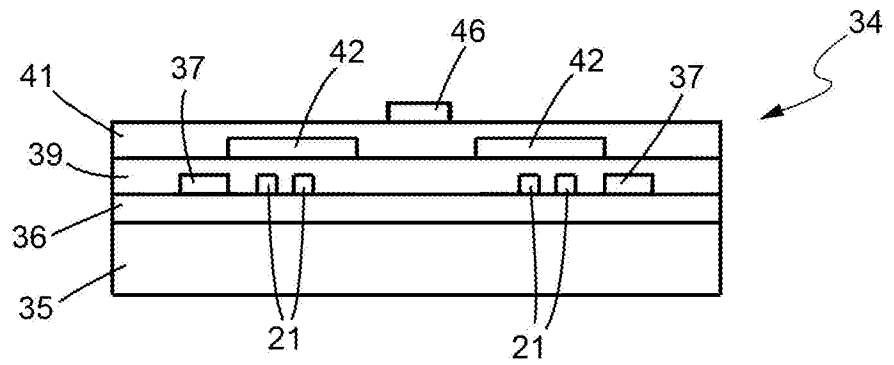
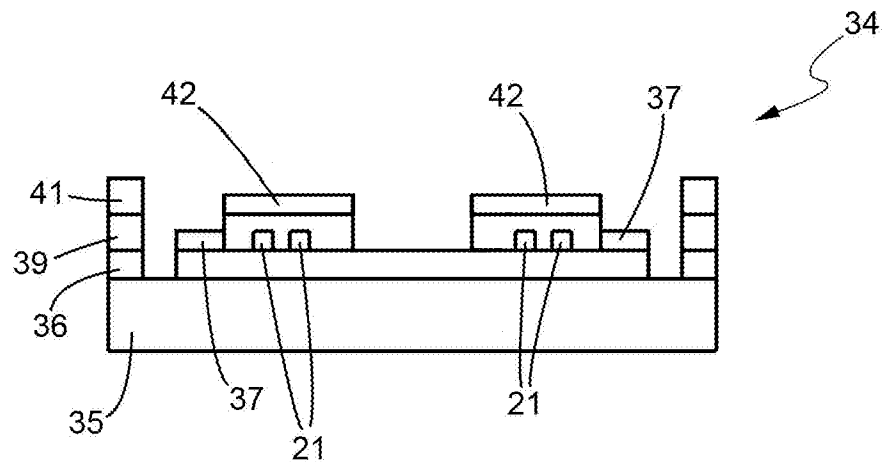


FIG. 15



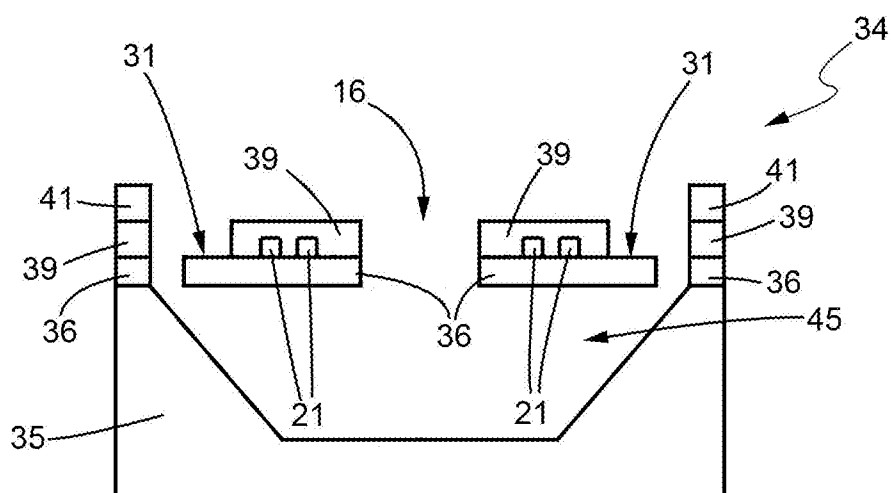


FIG. 16

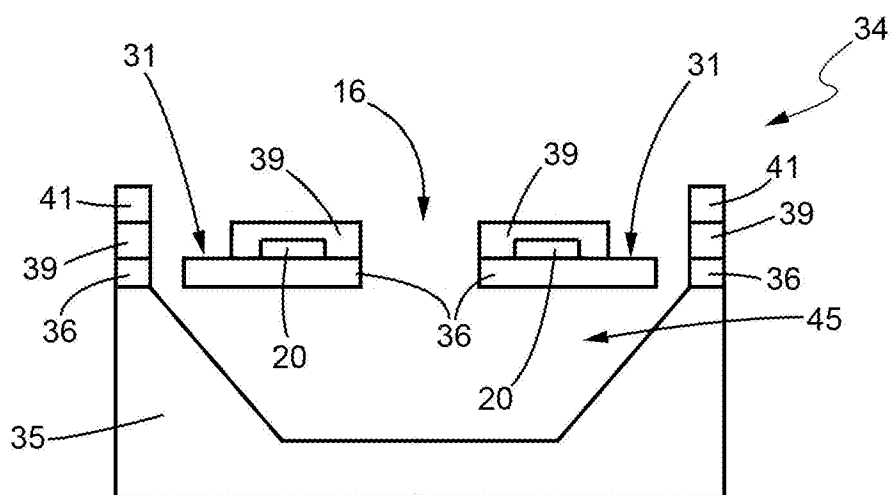


FIG. 17

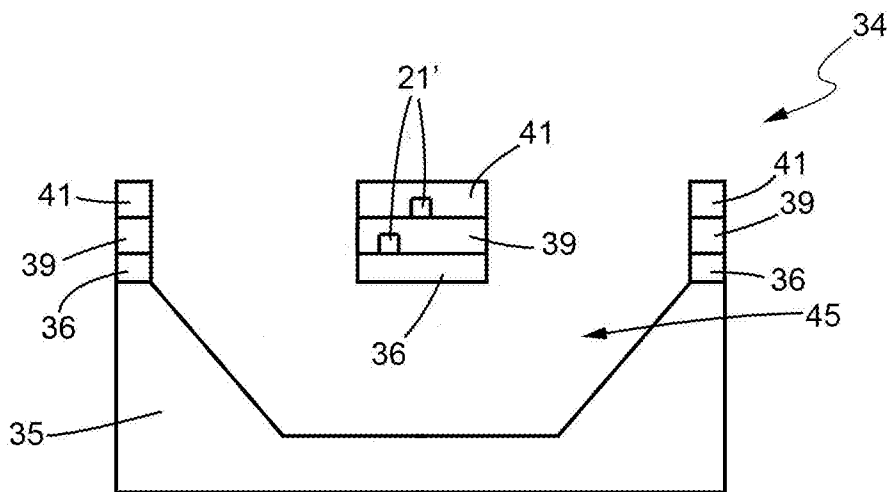


FIG. 18

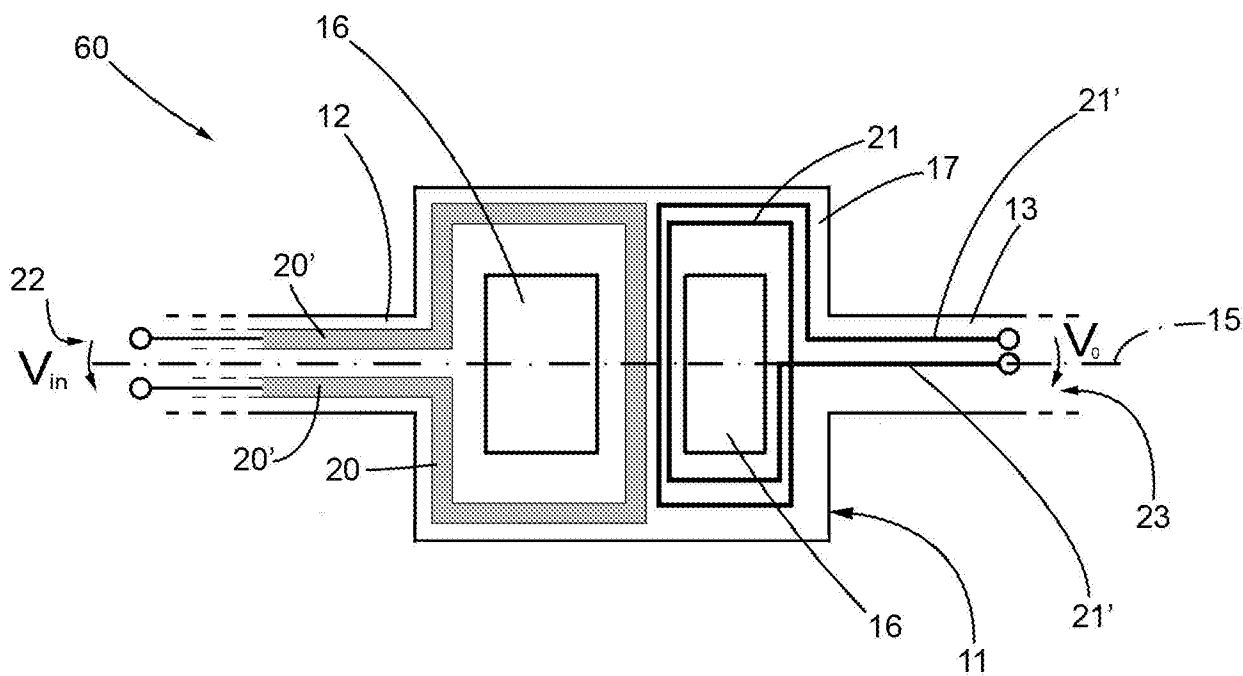


FIG. 19

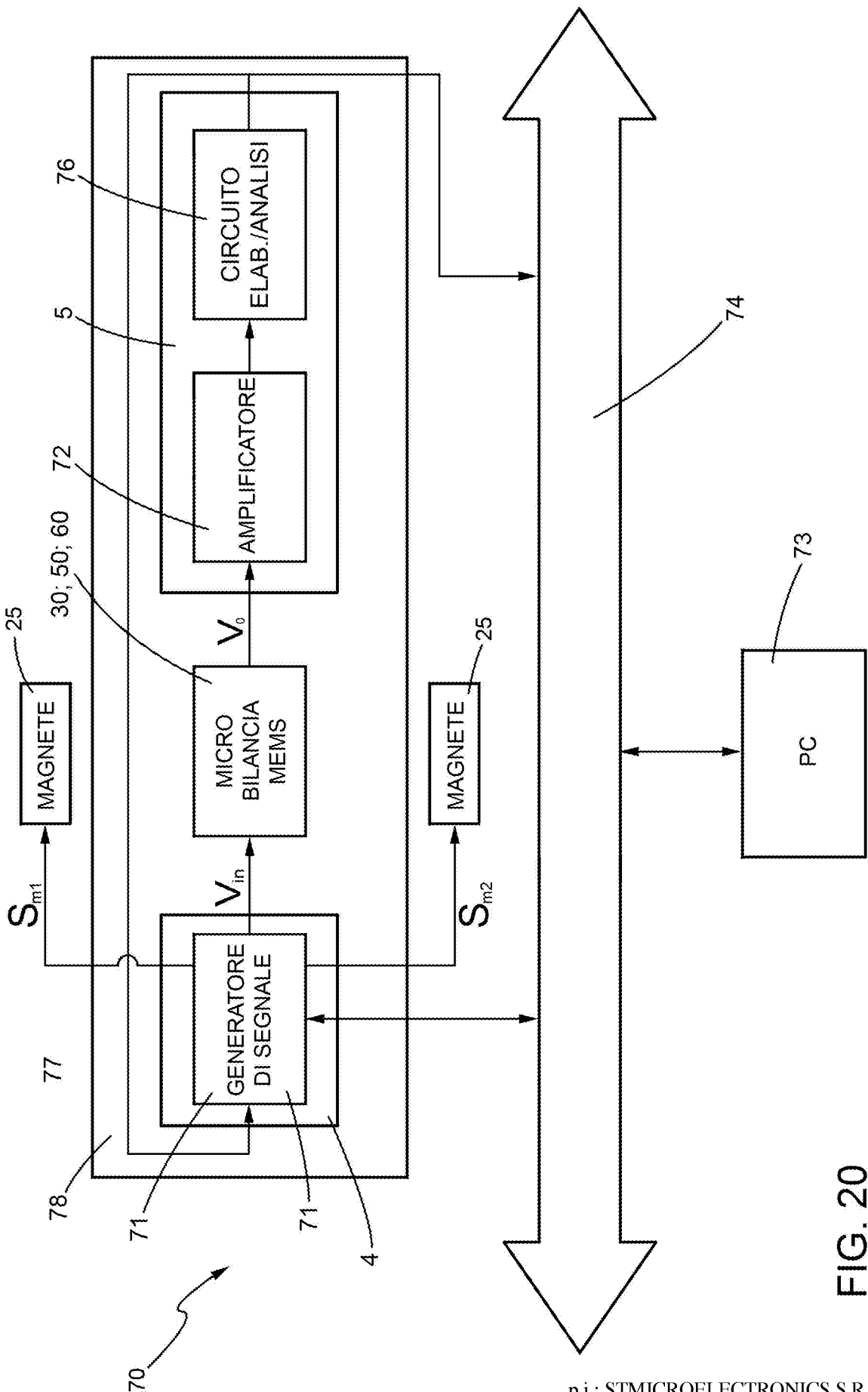


FIG. 20

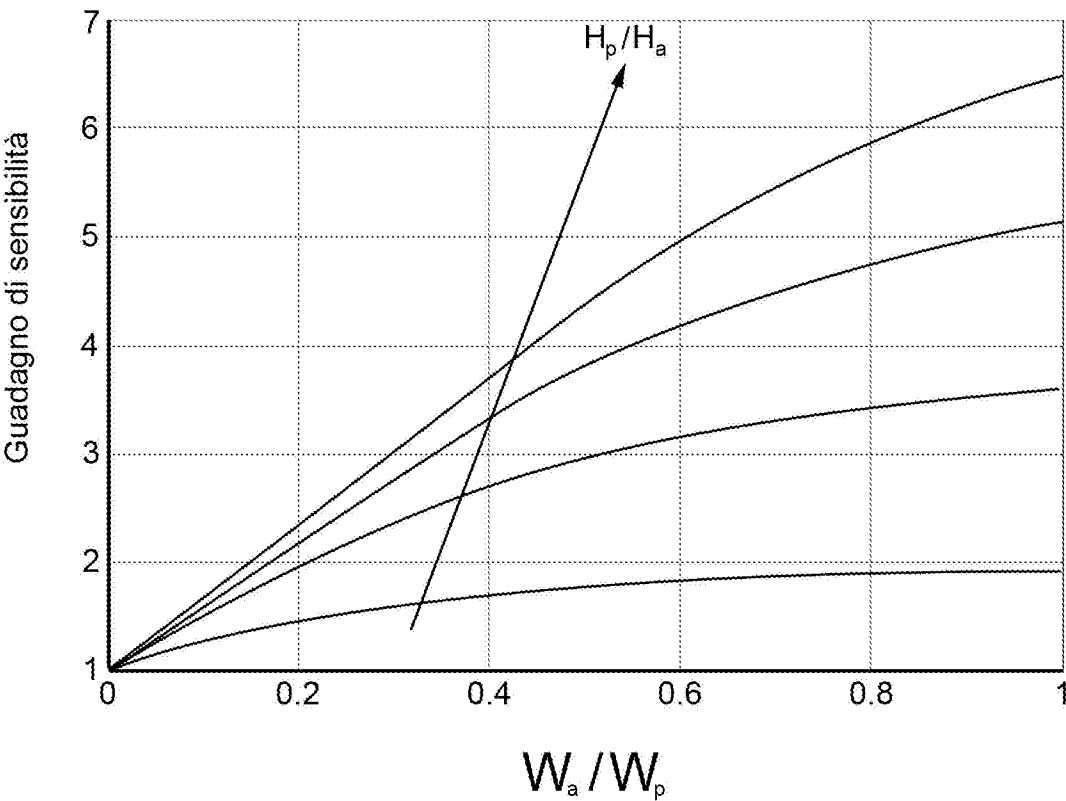


FIG. 21

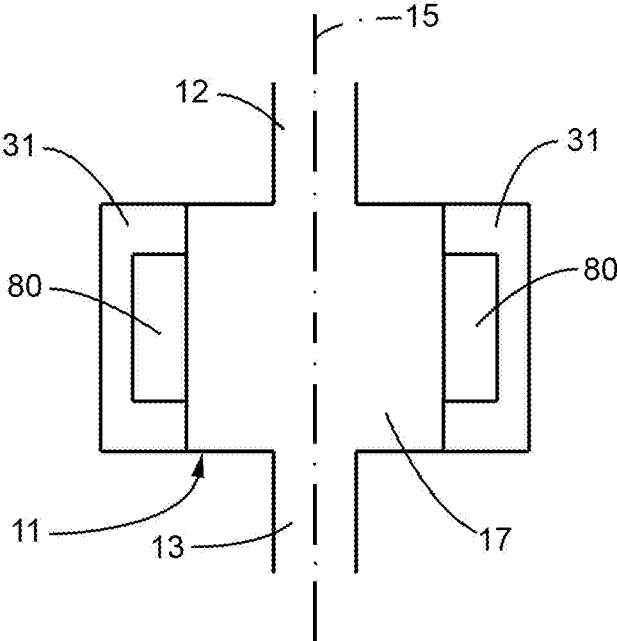


FIG. 22a

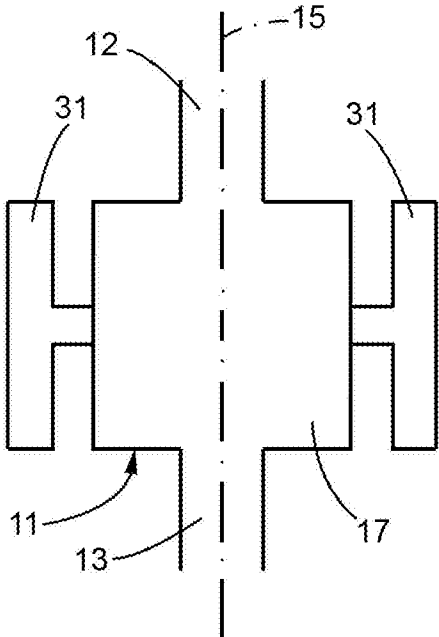


FIG. 22b

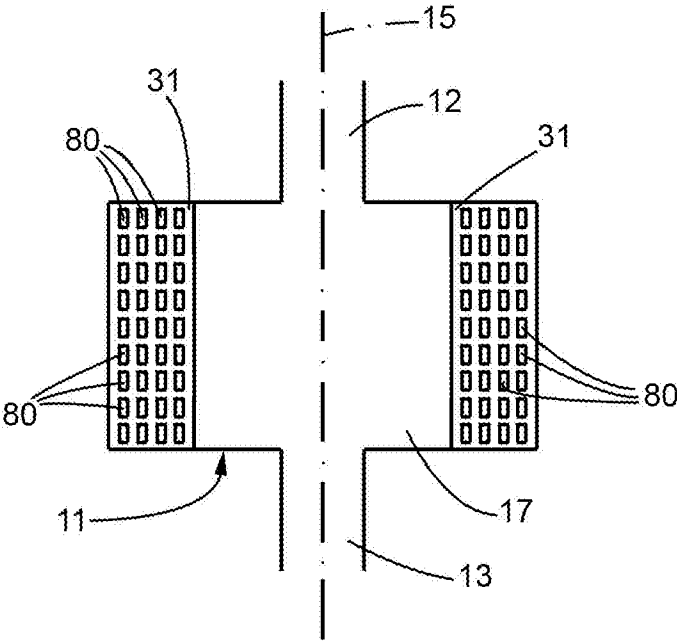


FIG. 22c

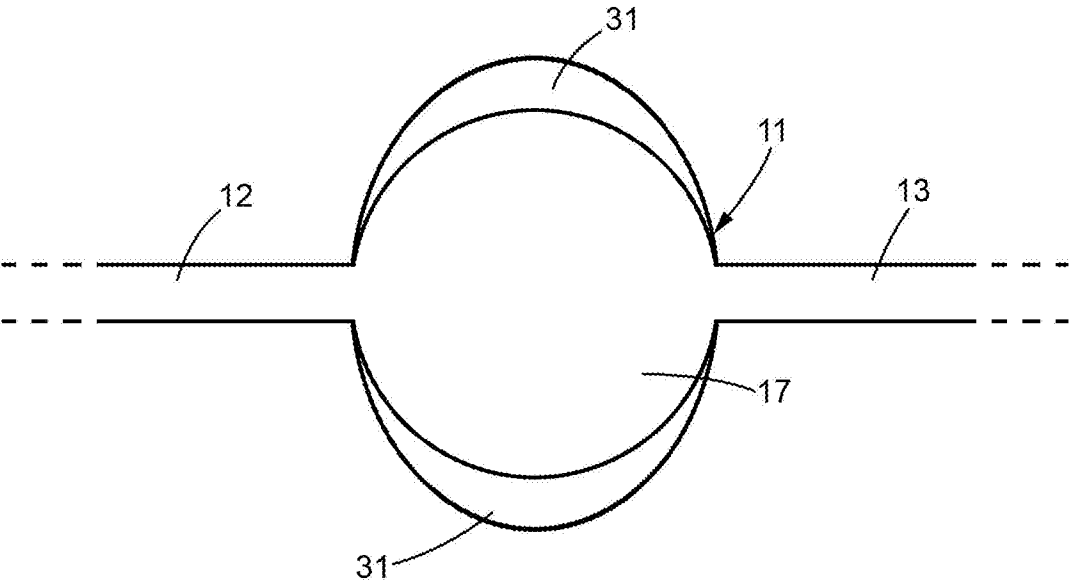


FIG. 23

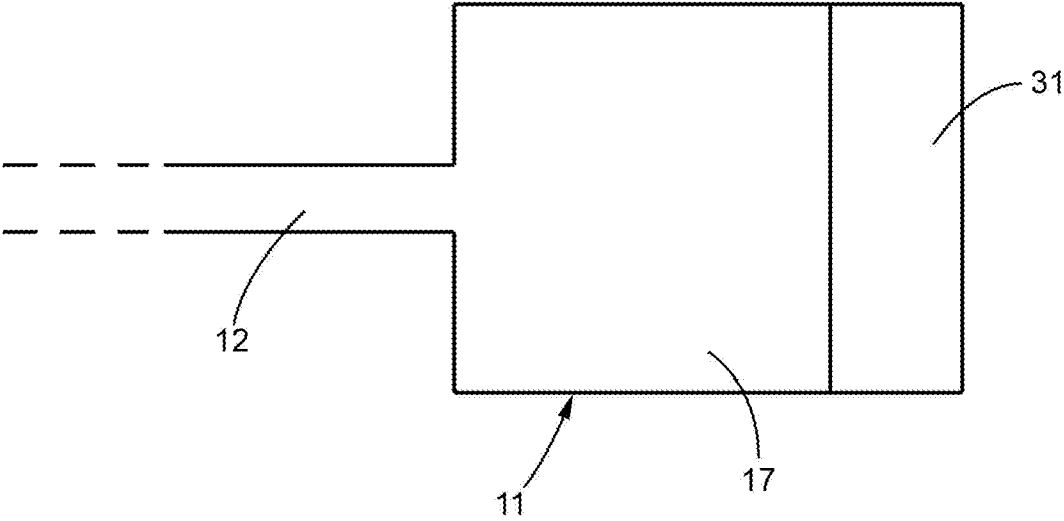


FIG. 24