

# ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102010901862909A1

Publication Date

20120130

Applicant

STMICROELECTRONICS S.R.L.

Title

ATTUATORE ELETTROMAGNETICO INTEGRATO, IN PARTICOLARE  
MICRO-POMPA ELETTROMAGNETICA PER UN DISPOSITIVO  
MICROFLUIDICO BASATO SU TECNOLOGIA MEMS, E RELATIVO  
PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE

## DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"ATTUATORE ELETTROMAGNETICO INTEGRATO, IN PARTICOLARE MICRO-POMPA ELETTROMAGNETICA PER UN DISPOSITIVO MICROFLUIDICO BASATO SU TECNOLOGIA MEMS, E RELATIVO PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI, 2

AGRATE BRIANZA (MB)

Inventori: RENNA Lucio, GALATI Clelia, SPINELLA Natalia Maria Rita, FALLICA Piero Giorgio

\* \* \*

La presente invenzione è relativa ad un attuatore elettromagnetico integrato, a un dispositivo microfluidico che utilizza l'attuatore, a un procedimento di fabbricazione dell'attuatore e del dispositivo microfluidico e ad un metodo di movimentazione di liquido utilizzando l'attuatore.

Sono note micro-pompe per generare un flusso di un fluido lungo una determinata direzione in un canale di un dispositivo microfluidico. Tali micro-pompe comprendono generalmente una membrana di materiale flessibile, disposta al di sopra di una porzione del canale, attuata in compressione tramite un attuatore piezoelettrico. Quando

l'attuatore piezoelettrico causa una deflessione della membrana verso il canale, il fluido presente nel canale viene movimentato all'interno del canale stesso, ad esempio da un foro di ingresso nel canale verso un foro di uscita dal canale. Tuttavia, poiché la deflessione della membrana causata da un attuatore piezoelettrico è generalmente limitata in ampiezza (poiché è limitato lo spostamento dell'attuatore piezoelettrico stesso), tali attuatori piezoelettrici sono generalmente operati ad alta frequenza di vibrazione, consumando così energia elettrica. Inoltre, l'attuatore piezoelettrico è realizzato di materiali generalmente costosi, causando un incremento dei costi di fabbricazione.

Per superare tali problemi sono state proposte micro-pompe ad attuazione elettromagnetica, ad esempio in US 2010/0111726. Tali micro-pompe comprendono un substrato 1, un piatto superiore 2, una membrana 3 deformabile comprendente un materiale magnetico, e un avvolgimento planare ("winding") 4. Il substrato 1 comprende, su una prima faccia, una scanalatura 5, al di sopra di cui è montato il piatto superiore 2. Il piatto superiore 2 è provvisto di un foro di ingresso 6, di un foro di uscita 7, e di un foro passante 8 disposto tra il foro di ingresso 6 e il foro di uscita 7, ed in comunicazione, quando montato sul substrato, con la scanalatura 5. La membrana 3 è

montata al di sopra del foro passante 8, in modo tale da chiudere quest'ultimo, formando così un serbatoio 9. Affacciata ad una faccia del substrato 1 opposta alla faccia su cui è montato il piatto superiore 2, è disposta la spira 4, in modo tale da essere allineata con il serbatoio 9. In uso, la spira 4 viene percorsa da corrente elettrica e, come noto, genera un campo magnetico il cui verso dipende dal verso di scorrimento della corrente. Poiché la membrana 3 comprende materiale magnetico, per campi magnetici di intensità sufficientemente elevata, tale membrana 3 può essere controllata in deflessione in avvicinamento al substrato 1 o in allontanamento dal substrato 1 semplicemente variando il verso di percorrenza della corrente nella spira 4. Quando la membrana 3 viene deflessa in modo tale da allontanarsi dal substrato 1, si crea una depressione all'interno del serbatoio 9 che causa un movimento del fluido dal foro di ingresso 6 verso il serbatoio 9, che si riempie. Quando la membrana 3 viene deflessa in modo tale da avvicinarsi al substrato 1, il fluido all'interno del serbatoio 9 viene compresso e fatto fuoriuscire dal serbatoio 9 stesso. Per favorire la fuoriuscita del fluido in direzione del foro di uscita 7 piuttosto che verso il foro di ingresso 6 (generando in questo modo un effettivo flusso del fluido lungo una direzione preferenziale), la micro-pompa descritta opera

secondo il principio di pompa ad impedenza ("impedance pump"). In dettaglio, la distanza tra il foro di ingresso 6 e il serbatoio 9, attraverso la scanalatura 5, è maggiore della distanza tra il serbatoio 9 e il foro di uscita 7. Quando la membrana 3 oscilla (o vibra) sotto la forza impressa dal campo magnetico generato dalla spira 4, viene generata una distribuzione di pressione non uniforme sul fluido, che viene spinto prevalentemente verso il foro di uscita 7. La portata di flusso ("flow rate") che si ottiene è tuttavia fortemente dipendente dalla frequenza di vibrazione della membrana 3, rendendo questa micro-pompa soggetta a problemi di pressione al variare della frequenza di vibrazione della membrana 3, e scarsamente modulabile.

Inoltre, la necessità di realizzare un serbatoio 9 in una posizione predefinita rispetto al foro di ingresso 6 e di uscita 7, per garantire una distribuzione di pressione non uniforme sul fluido da movimentare, rende questa micro-pompa di non pratica integrazione in sistemi di tipo "lab-on-chip".

Scopo della presente invenzione è realizzare un attuatore elettromagnetico integrato, un dispositivo microfluidico che utilizza l'attuatore, un procedimento di fabbricazione dell'attuatore e del dispositivo microfluidico e un metodo di movimentazione di liquido utilizzando l'attuatore esenti dagli svantaggi dell'arte

nota.

Secondo la presente invenzione sono forniti un attuatore elettromagnetico integrato, un dispositivo microfluidico che utilizza l'attuatore, un procedimento di fabbricazione dell'attuatore e del dispositivo microfluidico e un metodo di movimentazione di liquido utilizzando l'attuatore come definito rispettivamente nelle rivendicazioni 1, 12, 15, e 24.

In particolare l'attuatore comprende: una camera; una membrana flessibile comprendente una regione di materiale ferromagnetico ed estendentesi al di sopra della camera; un avvolgimento; ed un elemento di nucleo estendentesi internamente all'avvolgimento. In uso, l'avvolgimento e l'elemento di nucleo cooperano in modo tale che, quando l'avvolgimento è percorso da una corrente, viene generato un campo magnetico con verso e intensità tali da causare una deflessione della membrana verso la superficie inferiore della camera.

Per una migliore comprensione della presente invenzione 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, secondo una vista in sezione, una micro-pompa ad attuazione elettromagnetica di tipo noto;

- la figura 2 mostra, secondo una vista in sezione, un attuatore elettromagnetico secondo una forma di realizzazione della presente invenzione;

- le figure 3a-3c mostrano, in vista dall'alto, avvolgimenti ("winding") appartenenti all'attuatore di figura 2, secondo rispettive forme di realizzazione;

- la figura 4 mostra, in vista prospettica, l'attuatore elettromagnetico di figura 2;

- le figure 5a-5g mostrano una sequenza operativa di una pluralità di attuatori di figure 2 e 4, operanti secondo il principio di una pompa peristaltica a tre fasi;

- la figura 6 mostra in vista prospettica una porzione dell'attuatore elettromagnetico di figure 2 e 4;

- le figure 7-13 mostrano, in vista in sezione, fasi di fabbricazione dell'attuatore elettromagnetico di figura 2;

- la figura 14 mostra, in vista prospettica, un dispositivo diagnostico microfluidico che integra un attuatore elettromagnetico secondo una forma di realizzazione della presente invenzione;

- la figura 15 mostra uno schema a blocchi di un dispositivo per il rilascio controllato di farmaci che integra un attuatore elettromagnetico secondo una forma di realizzazione della presente invenzione; e

- la figura 16 mostra, in vista in sezione, un

attuatore elettromagnetico secondo una ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione.

La figura 2 mostra, in vista laterale in sezione, un attuatore 10 di tipo elettromagnetico secondo una forma di realizzazione della presente invenzione. In particolare, l'attuatore 10 è ad attuazione magnetica o elettromagnetica. Più in particolare, l'attuatore 10 è una micro-pompa configurata per essere integrata in dispositivi microfluidici.

L'attuatore 10 comprende un substrato 11, ad esempio di materiale semiconduttore, più in particolare di silicio. Alternativamente, il substrato 11 può essere di materiale plastico. Secondo una forma di realizzazione della presente invenzione, il substrato 11 può essere di tipo precedentemente lavorato, e presentante, in modo noto e non mostrato in figura, una o più regioni sovrapposte di materiale semiconduttore e/o dielettrico e/o metallico.

Su una faccia 11a del substrato 11 si estende un primo strato strutturale 12, ad esempio di ossido di silicio, disposto in contatto diretto con il substrato 11 tramite la faccia 11a. All'interno del primo strato strutturale 12 è formato un avvolgimento ("winding") 14, o induttore, fabbricato con tecnologia MEMS. L'avvolgimento 14 comprende una pluralità di spire concentriche e complanari, ed è completamente integrato all'interno del primo strato

strutturale 12. Ciascuna spira della pluralità di spire è di materiale conduttivo e ha, in vista dall'alto, forma circolare (figura 3a) o quadrangolare (figura 3b), o generalmente poligonale (figura 3c), o qualsiasi altra forma. L'avvolgimento 14 è di materiale conduttivo, in particolare di metallo quale, ad esempio, alluminio, oro, nichel, o una lega di essi, o qualsiasi altro metallo. L'avvolgimento 14, a seconda delle dimensioni e del grado di integrazione che si desidera ottenere, può essere formato da un numero di spire compreso tra 1 e 1000, per una lunghezza totale, in estensione, compresa tra 100  $\mu\text{m}$  e 100 m. Ciascuna spira è lateralmente separata dalle altre spire dell'avvolgimento 14 di una distanza compresa tra 100 nm e 100  $\mu\text{m}$ . Ciascuna spira ha inoltre larghezza compresa tra 100 nm e 100  $\mu\text{m}$ , e spessore compreso tra 10 nm e 100  $\mu\text{m}$ . Risulta evidente che le dimensioni precedentemente indicate per l'avvolgimento 14 sono esemplificative di possibili forme di realizzazione dell'avvolgimento 14. Secondo ulteriori forme di realizzazione della presente invenzione, l'avvolgimento 14 può avere dimensioni diverse da quelle indicate, maggiori o minori, e/o un numero di spire superiore a 1000.

Per consentire di contattare elettricamente entrambi i capi 14', 14" dell'avvolgimento 14, sono previste una prima e una seconda pista conduttiva 13, 15 formate su livelli

metallici ("metal layers") diversi tra loro. La prima pista conduttiva 13 è in contatto elettrico con una prima porzione terminale 14' dell'avvolgimento 14 appartenente alla spira più esterna dell'avvolgimento 14; la seconda pista conduttiva 15 è invece in contatto elettrico con una seconda porzione terminale 14" dell'avvolgimento 14, appartenente alla spira più interna dell'avvolgimento 14. La seconda pista conduttiva 15 è formata in uno strato metallico diverso dallo strato metallico in cui sono formate le spire e la prima pista conduttiva 13, in particolare in uno strato metallico più basso.

La prima e la seconda pista conduttiva sono collegate a mezzi di polarizzazione 19, in particolare un generatore di corrente, preferibilmente di tipo integrato nel substrato 11. Il generatore di corrente 19 è configurato per generare un flusso di corrente tra la prima porzione terminale 14' e la seconda porzione terminale 14" dell'avvolgimento 14. Inoltre, alternando il verso di scorrimento della corrente all'interno dell'avvolgimento 14, viene alterato di conseguenza il verso del campo magnetico generato.

Le spire dell'avvolgimento 14 definiscono una regione 16 interna all'avvolgimento 14 in cui è disposto un elemento di nucleo ("core element") 18, ad esempio di ferro, o cobalto, o nichel, o una miscela di essi, o, in

generale, di un qualsiasi materiale ferromagnetico. Anche l'elemento di nucleo 18 è completamente inserito all'interno del primo strato strutturale 12. Al di sopra del primo strato strutturale 12 è presente una camera o canale, indicato con il numero di riferimento 20, delimitato lateralmente da un secondo strato strutturale 22, disposto al di sopra dello ed in contatto diretto con il primo strato strutturale 12, e che definisce pareti laterali 20' del canale 20. Il secondo strato strutturale 22 è, ad esempio, di fotoresist. Un fotoresist utilizzabile è a base di polimeri acrilici, che possiedono buone caratteristiche di adesione e robustezza. Alternativamente, il secondo strato strutturale 22 è dello stesso materiale del primo strato strutturale 12, in particolare di ossido di silicio. Il secondo strato strutturale 22 ha spessore  $h$  compreso tra 1  $\mu\text{m}$  e 500  $\mu\text{m}$ , ad esempio pari a 20  $\mu\text{m}$ .

Il canale 20 è inoltre delimitato inferiormente dal primo strato strutturale 12, che definisce un fondo 20'' del canale 20.

Il canale 20 è separato dall'avvolgimento 14 da una porzione 12d del primo strato strutturale 12 avente spessore compreso tra 1 nm e 100  $\mu\text{m}$ , preferibilmente pari a 10 nm.

Al di sopra del secondo strato strutturale 22 è disposto uno strato di copertura ("cover") 24, in contatto

diretto con il secondo strato strutturale 22 in modo da sigillare ermeticamente superiormente il canale 20. Lo strato di copertura 24 è, ad esempio, un nastro adesivo ("adhesive tape") o una pellicola ("film") adesiva, o ancora uno strato di materiale reso adesivo ed accoppiato al secondo strato strutturale 22 in modo da sigillare il canale 20. Più in particolare, lo strato di copertura 24 è di un materiale polimerico trasparente, preferibilmente bio-compatibile, ad esempio scelto nel gruppo comprendente polietilene, vetro, plexiglass, policarbonato, polydimethylsiloxane (PDMS), o simili. O ancora, lo strato di copertura 24 è di un generico materiale elastomerico o a base elastomerica, come ad esempio il poliuretano.

Lo strato di copertura 24 ha spessore  $p$  preferibilmente compreso tra 1  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ , ad esempio pari a 10  $\mu\text{m}$ .

Al di sopra dello strato di copertura 24 è disposto un elemento passivo 26, ad esempio di materiale ferromagnetico come ferro, o nichel, o cobalto, o una miscela di essi, o qualsiasi altro materiale con proprietà ferromagnetiche. L'elemento passivo 26 è accoppiato allo strato di copertura 24 in modo tale che il movimento dell'elemento passivo 26 lungo un asse 28 sostanzialmente perpendicolare allo strato di copertura 24 causa un conseguente movimento dello strato di copertura 24 lungo lo stesso asse 28.

Lo strato di copertura 24 e l'elemento passivo 26 formano uno strato di membrana 27.

Il substrato 11 comprende inoltre, in modo non mostrato in figura 2, dispositivi elettronici atti ad alimentare una corrente  $i$  all'interno delle spire dell'avvolgimento 14. Come noto, il flusso di corrente  $i$  nell'avvolgimento 14 genera un campo magnetico definito da un vettore di campo magnetico avente direzione e verso dipendenti dalla direzione e verso della corrente  $i$  (secondo la nota regola della mano destra).

Qualora l'elemento passivo 26 abbia un proprio intenso campo magnetico, ad esempio nel caso in cui l'elemento passivo 26 sia di un materiale ferromagnetico precedentemente magnetizzato avente elevato valore di coercitività e di saturazione, alternando il verso di scorrimento del flusso di corrente all'interno dell'avvolgimento 14, è possibile generare un campo magnetico con verso alternato che causa l'azione di rispettive forze, con verso tra loro opposto, sull'elemento passivo 26. Queste forze sono tali da agire sull'elemento passivo 26 lungo la direzione definita dall'asse 28, parallelo all'asse Z e sostanzialmente ortogonale al piano XY su cui giace lo strato di copertura 24, per movimentarlo in entrambi i versi dell'asse 28.

Lo strato di copertura 24, nel suo movimento lungo

l'asse 28, ha gradi di libertà limitati dal fatto che è accoppiato al secondo strato strutturale 22 lungo porzioni periferiche 24' dello strato di copertura 24. Dunque solo una porzione centrale 24" dello strato di copertura 24 oscilla lungo l'asse 28 avvicinandosi ed allontanandosi dal fondo 20" del canale 20 a seconda del corrispondente movimento dell'elemento passivo 26.

L'avvolgimento 14, l'elemento di nucleo 18 dell'avvolgimento 14, e l'elemento passivo 26 formano un elemento attuatore elettromagnetico configurato per generare, quando una corrente viene fatta scorrere nell'avvolgimento 14 così da indurre un campo magnetico, una deformazione controllata, o una vibrazione, dello strato di copertura 24.

La figura 4 mostra, secondo una vista in prospettiva, l'attuatore 10 descritto con riferimento alla figura 2.

In uso, per garantire un flusso di un fluido presente nel canale 20 con direzione e verso predeterminati, è possibile disporre una pluralità di micro-pompe 10 lungo uno stesso canale 20 e operare tali micro-pompe 10 come mostrato nelle figure 5a-5g, che mostrano il principio di funzionamento di una pompa peristaltica a tre fasi.

In dettaglio, le figure 5a-5g mostrano, in forma schematica, un metodo per operare una pluralità di attuatori 10, in particolare sono mostrati tre attuatori

10, disposti in sequenza lungo un canale 20 comune. In questo caso, ciascun attuatore 10 opera come una micro-pompa. Per chiarezza di descrizione, si indica nel seguito con 10a l'attuatore 10 disposto a sinistra nella rappresentazione delle figure 5a-5g; con 10c l'attuatore 10 disposto a destra nella rappresentazione delle figure 5a-5g; e con 10b l'attuatore 10 disposto centralmente nella rappresentazione delle figure 5a-5g, tra l'attuatore 10a e l'attuatore 10c.

La figura 5a mostra una fase di partenza in cui le micro-pompe 10a-10c sono in uno stato di riposo, e nei rispettivi avvolgimenti 14 non scorre corrente.

Quindi, figura 5b, viene fatta scorrere corrente nell'avvolgimento 14 dell'attuatore 10a così da generare un campo magnetico che causa sull'elemento passivo 26 dell'attuatore 10a l'azione di una forza diretta verso il canale 20. Di conseguenza, lo strato di copertura 24 dell'attuatore 10a si abbassa, sotto la forza del campo generato e agente sull'elemento passivo 26, fino a contattare il fondo 20" del canale 20. Si ha quindi una prima spinta del fluido all'interno del canale 20.

In seguito, figura 5c, mantenendo lo strato di copertura 24 dell'attuatore 10a abbassato, in contatto con il fondo 20" del canale 20, viene fatta scorrere corrente nell'avvolgimento 14 dell'attuatore 10b, così da generare

un campo magnetico che causa sull'elemento passivo 26 dell'attuatore 10b l'azione di una forza diretta verso il canale 20. Di conseguenza, lo strato di copertura 24 dell'attuatore 10b si abbassa, fino a contattare il fondo 20" del canale 20. Si ha in questo caso una seconda spinta di fluido all'interno del canale 20, con verso definito dalla freccia 30 in figura 5c. Infatti, essendo il canale 20 chiuso dall'azione dell'attuatore 10a, l'unico verso di scorrimento possibile del fluido è quello definito dalla freccia 30.

Quindi, figura 5d, mantenendo lo strato di copertura 24 dell'attuatore 10b abbassato, in contatto con il fondo 20" del canale 20, viene fatta scorrere corrente nell'avvolgimento 14 dell'attuatore 10c, così da generare un campo magnetico che causa sull'elemento passivo 26 dell'attuatore 10c l'azione di una forza diretta verso il canale 20. Si ha anche in questo caso una ulteriore spinta di fluido all'interno del canale 20, con verso definito dalla freccia 30.

Come mostrato nelle successive figure 5e-5g, si riportano quindi gli strati di copertura 24 degli attuatori 10a-10c in posizione distanziata dal fondo 20" del canale 20. Effettuando questa operazione in sequenza, cioè riportando in posizione distanziata dal fondo 20" del canale 20 in sequenza l'attuatore 10a, quindi l'attuatore

10b e infine l'attuatore 10c, la porzione di canale 20 in corrispondenza degli attuatori 10a-10c si riempie di fluido proveniente dalla regione posta a sinistra delle micro-pompe 10a-10c. Si ottiene in questo modo un effettivo flusso di fluido, con verso definito dalla freccia 30, lungo l'intero canale 20.

Per riportare ciascun attuatore 10 in posizione di riposo è tipicamente sufficiente interrompere il flusso di corrente nel rispettivo avvolgimento 14. Tuttavia, per evitare eventuali problemi di adesione ("stiction") dello strato di copertura 24 al fondo 20" del canale 20, è possibile favorire l'allontanamento dello strato di copertura 24 dal fondo 20" del canale 20 generando un campo magnetico tale da guidare l'elemento passivo (e quindi lo strato di copertura 24) lungo la direzione definita dall'asse Z in allontanamento dal canale 20. Tale campo magnetico è generato facendo scorrere nell'avvolgimento 14 una corrente con verso opposto rispetto alla corrente utilizzata per attrarre l'elemento passivo 26 (e quindi lo strato di copertura 24) verso il canale 20. Questo fenomeno è possibile grazie alla elevata magnetizzazione residua che si ha per la maggior parte dei materiali ferromagnetici e può essere controllato scegliendo come materiale ferromagnetico dell'elemento passivo 26 un materiale con valore di coercitività maggiore rispetto al rispettivo

valore di coercitività dell'elemento di nucleo 18. In questo modo, per un opportuno valore del campo magnetico nell'avvolgimento 14, dopo l'inversione del verso di scorrimento della corrente, tale campo magnetico si trova in opposizione rispetto al campo magnetico residuo dell'elemento passivo 26, generando quindi una forza repulsiva.

Il principio di funzionamento dell'attuatore 10 descritto tiene conto di una pluralità di fenomeni fisici. È noto che il campo magnetico ortogonale al piano su cui giace l'avvolgimento 14, nel centro dell'avvolgimento 14 e supponendo un avvolgimento 14 con spire circolari, è dato dalla sommatoria dei contributi di ciascuna spira dell'avvolgimento 14. Come noto, una analisi dettagliata delle linee di campo magnetico, generato da un avvolgimento percorso da corrente, su piani paralleli al piano su cui giace la spira e disposti a varie distanze  $\delta$  dal piano su cui giace la spira, mostra che il campo magnetico non è uniforme. Tale non uniformità è verificata anche in punti diversi di un medesimo piano. È altresì noto che per valori di  $\delta \ll R$  (dove  $R$  è il raggio della spira più interna dell'avvolgimento 14), il campo magnetico può essere considerato, in prima approssimazione, uniforme nell'intero volume cilindrico di altezza pari a  $\delta$  e larghezza di base definita dalla spira più interna dell'avvolgimento 14.

La forza necessaria a deformare lo strato di copertura 24 può essere calcolata conoscendo il modulo di taglio ("shear modulus") del materiale che forma lo strato di copertura 24. La forza di attrazione magnetica esercitata sull'elemento passivo 26 può essere ricavata dall'analisi dell'energia di campo magnetico presente nella zona compresa tra l'elemento di nucleo 18 e l'elemento passivo 26. Trascurando lo spessore della porzione del primo strato strutturale 12 che separa il canale dall'avvolgimento 14 e dall'elemento di nucleo 18, lo spessore  $g$  di tale zona è dato da  $g \approx h + p$ . La presenza dell'elemento di nucleo 18 disposto internamente all'avvolgimento 14 produce, come noto, un guadagno del campo magnetico (tale guadagno ha un valore variabile, a seconda del materiale ferromagnetico utilizzato per formare l'elemento di nucleo 18, approssimativamente tra  $10^2$  e  $10^6$ ). Per valori di  $g \ll R$  è possibile considerare il campo magnetico nella regione compresa tra l'elemento di nucleo 18 e l'elemento passivo 26 come un campo uniforme.

Viene ora fornito un esempio numerico della forza magnetica esercitata su un elemento passivo 26 da un avvolgimento 14 provvisto di un elemento di nucleo 18, e formanti un attuatore 10 secondo la presente invenzione.

Si consideri un avvolgimento 14 comprendente 50 spire metalliche, in cui la spira più interna ha un raggio pari a

$R_1=250 \mu\text{m}$  e la spira più esterna ha un raggio pari a  $R_{50}=400 \mu\text{m}$ . Il filo conduttivo con cui è realizzata l'avvolgimento 14 è un filo di alluminio (più in dettaglio, una pista conduttiva planare di alluminio) di larghezza pari a  $1.5 \mu\text{m}$  e spessore pari a  $1.5 \mu\text{m}$ . Le spire sono lateralmente separate tra loro di  $1.5 \mu\text{m}$ . La corrente  $i$  che fluisce attraverso l'avvolgimento 14 ha un valore pari a circa 13 mA. Si noti che la corrente è mantenuta ad un valore basso per ragioni di massima sicurezza in quanto, per dimensioni delle spire (altezza e larghezza) nanometriche o micrometriche, un valore di corrente più elevato (ad esempio di uno o più ordini di grandezza) potrebbe causare la bruciatura dell'avvolgimento 14.

L'elemento di nucleo 18 è di materiale ferromagnetico e ha un valore di costante di permeabilità magnetica pari a  $\mu_m=10^3$ .

Inoltre, lo spessore dello strato di copertura è supposto pari a  $p=10 \mu\text{m}$  e il valore del modulo di taglio dello strato di copertura 24 è supposto pari a  $0.0086 \text{ GPa}$  (si considera in questo esempio uno strato di copertura 24 di poliuretano). La profondità del canale 20 è supposta pari a  $h=10 \mu\text{m}$  e l'angolo massimo di deformazione dello strato di copertura 24 per giungere a contatto con il fondo 20" del canale 20 è pari a  $45^\circ$ .

La forza minima  $F_M$  che deve essere applicata per

deformare lo strato di copertura 24 può essere calcolata sulla base della seguente formula (1):

$$\frac{F_M}{S_L} = G \cdot \text{tg}(\theta) \quad (1)$$

dove  $S_L$  è l'area di una superficie laterale dello strato di copertura 24 sezionato (mostrata in figura 6 con riempimento a tratteggio);  $G$  è il modulo di taglio dello strato di copertura 24; e  $\theta$  è l'angolo di deformazione dello strato di copertura 24.

Dunque, considerando uno strato di copertura avente spessore pari a 10  $\mu\text{m}$  e diametro pari a 500  $\mu\text{m}$ , il valore di  $S_L$  è dato da  $2\pi \cdot 500 \cdot 10 = 15700 \mu\text{m}^2$ . Si ottiene dunque un valore di forza  $F_M$  necessaria alla deformazione dello strato di copertura 24 pari a circa  $F_M = 0.13 \text{ Pa}$ .

Il valore di campo magnetico  $B_{\text{tot}}$  generato dall'avvolgimento 14, per tutte le spire di esso, è dato dalla seguente formula (2):

$$B_{\text{tot}} = \sum_{n=1}^{50} \frac{\mu_0 i}{2R_n} \mu_m \quad (2)$$

dove è stato considerato un avvolgimento avente 50 spire; un valore di corrente  $i$  pari a 13 mA; spire equispaziate aventi raggio minimo (spira più interna) pari a  $R_1 = 250 \mu\text{m}$  e raggio massimo (spira più esterna) pari a 400  $\mu\text{m}$ ; un valore di permeabilità magnetica dell'aria pari a  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ; e un valore di permeabilità magnetica dell'elemento di nucleo 18 pari a  $\mu_m = 10^3$ .

Si ottiene così un valore di  $B_{\text{tot}}$  pari a circa 1.31 T.

**Lorenzo NANNUCCI**  
(Iscrizione Albo nr. 1214/B)

Dato il valore di  $B_{tot}$  calcolato secondo la formula (2), la forza di attrazione  $F_A$  generata sullo strato di copertura 24 dall'elemento passivo 26 è data dalla seguente formula (3):

$$F_A = \frac{dU}{dg} = \frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad (3)$$

dove  $U$  è l'energia magnetica contenuta nel volume definito tra l'elemento di nucleo 18 e l'elemento passivo 26, data dalla formula (4):

$$U = \frac{1}{2\mu_0} B^2 g A \quad (4)$$

$g$  è la distanza che separa l'elemento di nucleo 18 dall'elemento passivo 26, sostanzialmente data dallo spessore dello strato di copertura ( $p$ ) sommato al valore di profondità del canale 20 ( $h$ ); e  $A$  è l'area dell'elemento di nucleo 18, supposta uguale all'area dell'elemento passivo 26 (con riferimento ai valori precedentemente indicati,  $A = \pi \cdot R_1^2 = \pi \cdot 250^2 = 196250 \text{ } \mu\text{m}^2$ ).

Sulla base dei valori esemplificativi precedentemente indicati, si ottiene un valore di forza di attrazione  $F_A = 0.13 \text{ N}$ .

Il valore di  $F_A$  è dunque atto a deflettere, in uso, lo strato di copertura 24 considerato.

Modificando a piacere i valori di corrente elettrica  $i$ , di spessore  $h$  del canale 20, di spessore  $p$  dello strato di copertura 24, il materiale con cui si formano l'elemento

di nucleo 18 e l'elemento passivo 26 (dunque variando il loro valore di permeabilità magnetica  $\mu_m$ ), il numero e le dimensioni delle spire dell'avvolgimento 14, e in generale gli altri parametri coinvolti nelle formule precedentemente specificate, è possibile variare il valore di forza applicata allo strato di copertura 24, variando di conseguenza le caratteristiche di compressione e di spinta del fluido presente, in uso, nel canale 20.

Una stima del flusso del fluido ottenuto applicando un valore di forza  $F_D$  come precedentemente indicato, può essere ottenuta assumendo che, ad ogni ciclo di pompaggio, il fluido presente nella porzione di canale sostanzialmente al di sotto dell'elemento passivo 26 sia completamente movimentato nello stesso verso, in particolare nel verso in cui si desidera ottenere lo scorrimento del fluido (ad esempio come indicato dalla freccia 30 nelle figure 5b-5g). Utilizzando una frequenza di ciclo di pompaggio pari a 10 Hz, si ottiene un flusso di fluido (in questo caso si suppone il fluido sia acqua) pari a 0.8  $\mu\text{L}/\text{min}$ .

Si fa qui notare che il valore di flusso può essere facilmente alterato (aumentato o diminuito) semplicemente variando il valore  $R$  del raggio delle spire dell'avvolgimento 14. In particolare, riducendo il valore di  $R$  si riduce il valore del flusso, che risulta utile in applicazioni che richiedono velocità di flussaggio

estremamente ridotte.

Risulta evidente che l'esempio mostrato è esemplificativo del funzionamento dell'attuatore 10. Una variazione delle caratteristiche di pompaggio può essere ottenuta variando altri parametri rispetto a quelli indicati, o la geometria di fabbricazione dei vari componenti dell'attuatore 10. Ad esempio, è possibile utilizzare spire 4 di forma quadrata, che meglio si adattano ("fit") alla geometria di un canale rettangolare.

Le figure 7-13 mostrano fasi successive di un Procedimento di fabbricazione dell'attuatore 10. Le figure 7-13 non mostrano fasi di fabbricazione del generatore di corrente 19, che viene realizzato in forma integrata nel substrato 11 in modo noto.

Come mostrato in figura 7, viene disposto un substrato 11, ad esempio di materiale semiconduttore, preferibilmente di silicio, o, in alternativa, di materiale plastico. Il substrato 7 comprende il generatore di corrente 19 (qui non mostrato). Quindi, sul fronte ("front side") 11a del substrato 11, opposto al retro ("back side") 11b del substrato 11, viene formato un primo strato intermedio 12a, ad esempio di ossido di silicio cresciuto termicamente o depositato.

Quindi, figura 8, al di sopra del primo strato intermedio 12a viene formato, ad esempio tramite tecniche

note di deposizione, uno strato di materiale conduttore che viene quindi sagomato, tramite note tecniche di litografia e attacco ("etching") in modo tale da formare una pista conduttiva 15 estendentesi verso una regione periferica del substrato 11. Come già descritto con riferimento alla figura 2, la pista conduttiva 15 ha, in uso, la funzione di formare un collegamento elettrico tra la spira più interna dell'avvolgimento 14 (non ancora formato nella fase di processo di figura 8) e mezzi di polarizzazione esterni all'avvolgimento 14 (qui non mostrati). La pista conduttiva 15 può essere di metallo, ad esempio alluminio. Alternativamente, la pista conduttiva 15 può essere di polisilicio drogato.

Quindi, viene formato un secondo strato intermedio 12b al di sopra della pista conduttiva 15 e del primo strato intermedio 12a. In seguito alla formazione del secondo strato intermedio 12b, quest'ultimo, se necessario, viene planarizzato. Il secondo strato intermedio 12b è, preferibilmente, dello stesso materiale del primo strato intermedio 12a, nell'esempio descritto ossido di silicio.

In seguito, figura 9, tramite successive fasi di litografia e attacco, viene aperto un foro di contatto 32 attraverso il secondo strato intermedio 12b, fino a raggiungere la pista conduttiva 15. Si effettua quindi una fase di formazione di uno strato di materiale conduttivo 34

al di sopra del secondo strato intermedio 12b e all'interno del foro di contatto 32, formando in questo modo un percorso conduttivo tra la pista conduttiva 15 e lo strato di materiale conduttivo 34.

Quindi, figura 10, tramite successive fasi di litografia e attacco, lo strato di materiale conduttivo 34 viene sagomato in modo tale da formare l'avvolgimento 14, comprendente una pluralità di spire concentriche. La spira più interna dell'avvolgimento 14 è in contatto, tramite una sua porzione terminale, con il foro di contatto 32 e, tramite quest'ultimo, con la pista conduttiva 15.

Secondo una forma di realizzazione della presente invenzione, l'avvolgimento 14 ha, in vista dall'alto, forma circolare. La spira più interna ha, ad esempio, diametro  $D_I$  compreso tra  $10\ \mu\text{m}$  e  $5000\ \mu\text{m}$  preferibilmente pari a  $500\ \mu\text{m}$ , mentre la spira più esterna ha diametro  $D_O$  compreso tra  $20\ \mu\text{m}$  e  $20000\ \mu\text{m}$ , preferibilmente pari a  $1600\ \mu\text{m}$ .

Secondo un'ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione, l'avvolgimento 14 ha, in vista dall'alto, forma quadrata. In questo caso,  $D_I$  indica la lunghezza del lato del quadrato più interno, mentre  $D_O$  indica la lunghezza del lato del quadrato più esterno.

Ciascuna spira dell'avvolgimento 14 ha larghezza compresa tra  $0.1\ \mu\text{m}$  e  $100\ \mu\text{m}$ , preferibilmente pari a  $1\ \mu\text{m}$ . Inoltre, le spire sono distanziate tra loro di una distanza

compresa tra  $0.1 \mu\text{m}$  e  $100 \mu\text{m}$ , preferibilmente pari a  $1 \mu\text{m}$ .

Quindi, figura 11, viene formato, al di sopra del secondo strato intermedio 12b, un terzo strato intermedio 12c. Il terzo strato intermedio 12c riempie lo spazio tra le spire dell'avvolgimento 14 ed è di materiale dielettrico. Ad esempio, il terzo strato 12c è di ossido di silicio depositato. In seguito alla formazione del terzo strato intermedio, quest'ultimo viene rimosso in corrispondenza di una regione definita internamente dall'avvolgimento 14, fino ad esporre la superficie del secondo strato intermedio 12b. Si forma quindi uno strato di materiale ferromagnetico (ad esempio ferro, o nichel, o cobalto, o una miscela di essi) tale da coprire la superficie esposta del secondo strato intermedio 12b, formando l'elemento di nucleo 18. L'elemento di nucleo 18 ha spessore circa uguale allo spessore delle spire dell'avvolgimento 14, ad esempio compreso tra  $0.01 \mu\text{m}$  e  $100 \mu\text{m}$ , preferibilmente pari a  $1 \mu\text{m}$ . Eventuale materiale ferromagnetico presente al di sopra del terzo strato intermedio 12c in seguito alla fase di formazione dell'elemento di nucleo 18 viene rimosso.

In seguito, figura 12, viene formato al di sopra dell'elemento di nucleo 18, del terzo strato intermedio 12c e dell'avvolgimento 14, un quarto strato intermedio 12d, di materiale dielettrico, ad esempio di ossido di silicio. Il

quarto strato intermedio 12d ha spessore compreso tra 1 nm e 100  $\mu\text{m}$ , preferibilmente pari a 10 nm.

Risulta evidente che il quarto strato intermedio 12d, formando al termine delle fasi di fabbricazione il fondo 20" del canale 20, può essere realizzato per ragioni dipendenti dalla particolare applicazione dell'attuatore 10, di materiali diversi dall'ossido di silicio. Ad esempio, può essere di strati polimerici depositati, supporti plastici trasparenti, o ossinitruro, o può essere passivato dopo la sua formazione.

Il primo 12a, il secondo 12b, il terzo 12c, e il quarto 12d strato intermedio formano il primo strato strutturale 12 di figura 2.

Si forma quindi, al di sopra del quarto strato intermedio 12d, un secondo strato strutturale 22, ad esempio di  $\text{SiO}_2$  deposto fotoresist di tipo secco formato mediante laminazione. Alternativamente, il secondo strato strutturale 22 può essere formato mediante spinning di fotoresist di tipo liquido. Si esegue quindi un processo fotolitografico, per definire un canale 20 all'interno del secondo strato strutturale 22. A tal fine, una maschera (non mostrata), definente (in modo positivo o negativo, a seconda del photoresist utilizzato) il canale 20, viene utilizzata per la fase di fotolitografia. Una successiva fase di attacco consente di rimuovere porzioni selettive

del secondo strato strutturale 22 fino ad esporre il quarto strato intermedio 12d, formando così il canale 20 delimitato lateralmente dal secondo strato strutturale 22 ed inferiormente dal quarto strato intermedio 12d.

Il canale 20 è formato sostanzialmente in corrispondenza dell'elemento di nucleo 18. A tal fine, possono essere previsti segni di allineamento, di tipo noto.

Infine, figura 13, uno strato di copertura 24 viene disposto al di sopra del canale 20, in contatto con il secondo strato strutturale 22. Lo strato di copertura 24 è, ad esempio, come detto, un nastro o una pellicola adesivi, di materiale polimerico trasparente compatibile. Lo strato di copertura 24 può anche essere una membrana sospesa di ossido di silicio o di silicio di spessore sufficientemente sottile da flettersi o deformarsi, ad esempio con spessore compreso tra 3 e 70 nm. Risulta evidente che minore è l'angolo richiesto per la deformazione maggiore può essere lo spessore dello strato di copertura 24.

Al di sopra dello strato di copertura 24 viene formato, tramite tecniche di sputtering o "screen printing" o "ink-jet printing", l'elemento passivo 26, di materiale ferromagnetico, ad esempio ferro, o nichel, o cobalto, o una miscela di essi. L'elemento passivo 26 è formato sostanzialmente in corrispondenza dell'elemento di nucleo

18 e verticalmente allineato con esso. A tal fine, possono essere previsti segni di allineamento (non mostrati) atti a consentire l'allineamento dell'elemento passivo 26 con l'elemento di nucleo 18. Si ottiene in questo modo l'attuatore 10 di figura 2.

La figura 14 mostra una vista prospettica un dispositivo integrato 50, in particolare un dispositivo diagnostico, comprendente un dispositivo di movimentazione fluido 51 includente una pluralità di attuatori 10 del tipo precedentemente descritto. In particolare, il dispositivo di movimentazione fluido 51 comprende tre attuatori 10 operanti come descritto e mostrato con riferimento alle figure 5a-5g. Secondo la forma di realizzazione mostrata in figura 14, l'avvolgimento 14, l'elemento di nucleo 18 e l'elemento passivo degli attuatori 10 hanno forma quadrata.

Il dispositivo diagnostico 50 comprende un substrato 110 (comune a tutti gli attuatori 10, analogo al substrato 11) e un primo strato strutturale 120 (anch'esso comune agli attuatori 10, analogo al primo strato strutturale 12), disposto al di sopra del ed in contatto diretto con il substrato 110. Il substrato 110 comprende componenti elettronici integrati (mostrati schematicamente), in particolare atti a realizzare il generatore di corrente 19.

Al di sopra del primo strato strutturale 120 si estende il secondo strato strutturale 220 (anch'esso comune

a tutti gli attuatori 10, analogo al secondo strato strutturale 22) in cui è realizzato un canale 53 in collegamento fluidico con ciascun rispettivo canale 20 di ciascun attuatore 10.

Il primo strato strutturale 120, in particolare in corrispondenza del fondo 53" del canale 53, è, in questo caso, di un materiale compatibile con l'utilizzo del dispositivo diagnostico 50, ad esempio di materiale biocompatibile (ad esempio, ossido di silicio). In alternativa, può essere utilizzato uno strato non biocompatibile, passivato in corrispondenza del fondo 53" del canale 53. Comuni materiali di passivazione includono silani, albumina, DNA di sperma di salmone sonicato, oligonucleotidi esameri casuali ("random hexamer oligonucleotide"), e simili. Inoltre, in alcune applicazioni, può essere necessario funzionalizzare una o più superfici per l'immobilizzazione di recettori, ad esempio aggiungendo gruppi idrossili (gruppi OH). Qui ci si riferisce a tutte queste superfici come "compatibili", intendendo che la superficie è compatibile con il saggio e con i recettori utilizzati nel dispositivo.

Lo spessore del substrato 110 è variabile e scelto in modo da garantire allo stesso tempo facilità di fabbricazione del dispositivo diagnostico 50 e degli attuatori 10 integrati, e anche resistenza agli urti del

dispositivo diagnostico 50 e degli attuatori 10.

Il secondo strato strutturale 220 presenta, secondo un'ulteriore forma di realizzazione non mostrata in figura, una pluralità di canali analoghi al canale 53. Nel caso in cui siano presenti una pluralità di canali 53, ciascun canale 53 è isolato da altri canali 53 mediante il secondo strato strutturale 220.

Il canale 53 mostrato in figura 14 ha forma, in vista dall'alto, rettangolare, ed è isolato su tutti e quattro i lati dal secondo strato strutturale 220. Altre forme, diverse dalla forma rettangolare, sono possibili, ad esempio a serpentina circolare, quadrata, o in generale poligonale, ad esempio con o senza angoli smussati. Nel caso di più canali 53 su uno stesso dispositivo diagnostico 50, ciascun canale 53 può comunque avere forma e dimensioni diverse dalla forma e dalle dimensioni degli altri canali 53, scelte in fase di progetto secondo necessità.

Il canale 53 alloggia una o più regioni rilevamento 52 (ad esempio nella forma di "spot" alloggiati in serie lungo il canale 53 e separati tra loro di circa 100  $\mu\text{m}$ ), comprendenti biomolecole recettori depositate in modo noto. Ad esempio, si può utilizzare una tecnica di spotting automatizzato ("automated spotting technique"), che sostanzialmente prevede l'utilizzo di un braccio meccanico che, in modo automatico, preleva il materiale biologico da

depositare (in soluzione liquida) e, con precisione micrometrica, deposita gocce di tale materiale biologico nel canale 53, formando le regioni rilevamento 52. Tipicamente, ciascuna di tali gocce è di pochi picolitri, ma le gocce possono essere ampie fino a 1-5  $\mu$ l, o più larghe, a seconda dell'applicazione e della dimensione disponibile del campione. In alternativa, l'intera superficie di una certa regione può essere ricoperta se desiderato per l'applicazione considerata.

Inoltre, il dispositivo diagnostico 50 comprende un foro di ingresso 54 ed un foro di uscita 56, formati attraverso il substrato 110 e il primo strato strutturale 120 e atti a formare, rispettivamente, un percorso di accesso (si veda la freccia 60) dall'esterno del dispositivo diagnostico 50 verso il canale 53 ed un percorso di uscita (si veda la freccia 61) dal canale 53 verso l'esterno del dispositivo diagnostico 50.

Il dispositivo diagnostico 50 comprende inoltre uno strato di copertura 240, che copre il canale 53 e forma, allo stesso tempo, lo strato di copertura 24 degli attuatori 10. Lo strato di copertura 240 ha dunque caratteristiche analoghe a quelle descritte con riferimento allo strato di copertura 24.

Lo strato di copertura 240 è disposto al di sopra dello ed in contatto con il secondo strato strutturale 220,

e ha la funzione sia di supportare l'elemento passivo 26 di ciascun attuatore 10 e di sigillare ermeticamente superiormente il canale 53. In questo modo, gli unici punti di accesso al canale 53 sono il foro di ingresso 54 ed il foro di uscita 56. Lo strato di copertura 240 è, ad esempio, di materiale elastomerico, in particolare trasparente alla luce. Nel caso in cui il canale 53 sia trasparente alla luce, esso è completamente otticamente accessibile dall'esterno del dispositivo diagnostico 50, il quale può essere utilizzato in sistemi a fluorescenza o ad ispezione visiva. In generale, è importante che la fase di copertura del canale 53 non danneggi i recettori o il materiale depositato nel canale 53, e dunque dovrebbero essere esclusi processi che prevedono, ad esempio, trattamenti termici ad alta temperatura o mediante l'utilizzo di plasma nel caso di molecole sensibili al calore.

I fori di ingresso e uscita 54, 56 possono essere provvisti di un rispettivo elemento di chiusura (non mostrati), ad esempio un tappo di materiale plastico o elastomerico, sigillante il canale 53. I fori di ingresso e uscita 54, 56 possono anche essere provvisti di un sistema ad innesto rapido per connessioni fluidiche, di tipo noto, ad esempio filettature o "clamp".

Le regioni rilevamento 52 comprendono, ad esempio, un

dato tipo di recettori, come ad esempio biomolecole (DNA, RNA, proteine, antigeni, anticorpi, ecc.) o microrganismi o parti di essi (batteri, virus, spore, cellule, organelli, ecc.) o qualsiasi elemento chimico utilizzato per rilevare un analita. I recettori, provvisti di marcatori specifici, ad esempio marcatori fluorescenti, sono immobilizzati sul fondo 53" del canale 53. Secondo forme di realizzazione alternative, i recettori possono essere liberi in soluzione invece che immobilizzati al dispositivo, a seconda dell'applicazione per cui il dispositivo diagnostico 50 è impiegato. Tuttavia, saggi a fase solida sono generalmente preferiti poiché essi consentono il lavaggio di materiale non immobilizzato e quindi aumentano la sensibilità e semplicità dei saggi di rilevamento.

Quando questi recettori vengono posti in contatto diretto con un campione biologico da analizzare comprendente molecole in grado di combinarsi con tali recettori, la combinazione delle molecole con i recettori attiva marcatori specifici, ad esempio marcatori fluorescenti. Quando i marcatori fluorescenti sono attivati, essi possono emettere autonomamente una radiazione luminosa. Alternativamente, tali marcatori fluorescenti possono essere indotti in uno stato di emissione luminosa mediante eccitazione esterna. Solo i marcatori attivati sono in grado di emettere una propria

radiazione luminosa, mentre i marcatori non attivati non rispondono all'eccitazione esterna (o comunque, in generale, non emettono radiazione luminosa o emettono luce ad una radiazione diversa).

Operando gli attuatori 10 secondo le fasi descritte con riferimento alle figure 5a-5g, il liquido biologico o il campione è fatto fluire dal foro di ingresso 54 (si veda la freccia 60) lungo l'intero canale 53 (si veda la freccia 63). In questo modo, il liquido biologico entra in contatto con le regioni di rilevamento 52 e quindi fuoriesce dal canale 53 attraverso il foro di uscita 56 (si veda la freccia 61).

Il rilevamento della fluorescenza può essere effettuato con canale 53 svuotato, non svuotato o svuotato solo parzialmente, come desiderato per l'applicazione ricercata.

Le fasi di fabbricazione del dispositivo diagnostico 50 corrispondono alle fasi di fabbricazione dell'attuatore 10, mostrate e descritte con riferimento alle figure 7-13. Tuttavia, al fine di formare i fori di ingresso e uscita 54, 56 e le regioni rilevamento 52, ulteriori fasi di processo sono previste.

In dettaglio, si procede con la formazione dei fori di ingresso 54 e di uscita 56 ad esempio dopo le fasi descritte con riferimento alla figura 12. A tal fine, si

forma sul retro 110b del substrato 110 una maschera atta a definire regioni in cui si desidera formare il foro di ingresso 54 e di uscita 56.

Quindi, mediante successive fasi di attacco ("etching"), si rimuovono le porzioni del substrato 110 lasciate scoperte dalla maschera, fino a raggiungere il primo strato strutturale 120. Quindi, mediante un successivo attacco, si rimuovono porzioni del primo strato strutturale 120 fino a raggiungere il canale 53. Nel caso in cui il primo strato strutturale 120 sia interamente di ossido di silicio, è sufficiente un solo attacco per raggiungere il canale 53. Alternativamente, nel caso in cui lo strato strutturale 120 comprenda diversi materiali sovrapposti, possono essere necessarie più fasi di attacco, ciascuna di esse selettiva per il tipo di materiale da rimuovere. Inoltre, l'attacco può essere sia di tipo secco ("dry") o umido ("wet"), come desiderato.

Si mette così in comunicazione fluidica il retro 110b del substrato 110 con il canale 53, formando il foro di ingresso 54 e il foro di uscita 56.

Nel caso di substrato 110 di silicio e primo strato strutturale 120 di ossido di silicio, l'attacco per la formazione dei fori di ingresso 54 e di uscita 56 può essere un attacco al plasma ("plasma etching") utilizzando in alternativa tra loro,  $SF_6$ ,  $CF_4$ , o una combinazione di  $SF_6$

e  $C_4F_8$ . La fase di formazione dei fori è preferibilmente compatibile con la tecnologia TSV ("Through Silicon Via"), che consente di rimuovere in una singola fase di attacco sia porzioni del substrato 11 che porzioni del primo strato strutturale 120.

Per la formazione delle regioni rilevamento 52, si procede, in seguito alla formazione dei fori di ingresso e uscita 54, 56, con una fase di pulizia del fondo 53" del canale 53, ad esempio utilizzando una soluzione piranha, cioè una miscela di acido solforico  $H_2SO_4$  e perossido di idrogeno  $H_2O_2$ , o, in alternativa, un lavaggio RCA-1 (talvolta chiamato standard clean SC-1), cioè una miscela di  $H_2O$ ,  $NH_4OH$ ,  $H_2O_2$ , che può essere seguito da una ulteriore pulizia con un secondo lavaggio utilizzando una miscela di  $H_2O_2$ ,  $HCl$  e  $H_2O$ . Quindi, si effettua con una fase di pulizia e attivazione (ad esempio, per esporre gruppi OH) del fondo 53" del canale 53, mediante una miscela di  $HCl$  e  $CH_3OH$ , e quindi si esegue una fase di funzionalizzazione del fondo 53" del canale 53 (ad esempio, mediante silanizzazione). Vengono quindi formate le regioni rilevamento 52, ad esempio utilizzando una tecnica automatica di spotting. Poiché il fondo 53" del canale 53 è superiormente completamente accessibile, la fase di spotting non richiede complessi procedimenti di allineamento. Poiché questa fase è di tipo noto, essa non è qui ulteriormente descritta.

Si forma in questo modo il dispositivo diagnostico 50 di figura 14.

Secondo un'ulteriore applicazione della presente invenzione, uno o più attuatori 10 possono essere integrati in un dispositivo per il rilascio controllato di farmaci 70 (mostrato in forma schematica in figura 15). Tale dispositivo per il rilascio controllato di farmaci 70 comprende un serbatoio 72 atto a contenere un farmaco, in soluzione liquida, che deve essere somministrato ad un paziente. Il serbatoio 72 è collegato ad un foro di rilascio 76 del dispositivo 70, tramite cui il farmaco viene rilasciato nella zona da trattare. Il percorso del farmaco dal serbatoio 72 al foro di rilascio 76 avviene attraverso un canale 74 provvisto di un dispositivo di movimentazione fluido 75, in particolare comprendente uno o più attuatori 10 del tipo descritto con riferimento alla figura 2, operanti come micro-pompe secondo le fasi descritte con riferimento alle figure 5a-5g (del tipo già mostrato e descritto con riferimento al dispositivo diagnostico 50 di figura 14).

Configurando opportunamente le dimensioni dei canali 20, 74 (che sono in collegamento fluidico tra loro) e/o la forza di compressione esercitata da ciascun attuatore 10 sul liquido presente, in uso, nel canale 20, è possibile regolare secondo necessità la quantità di farmaco

rilasciato tramite il foro di rilascio 76.

Il processo di fabbricazione dell'attuatore 10 descritto con riferimento alle figure 7-13, e/o del dispositivo diagnostico 50, e/o del dispositivo per il rilascio controllato di farmaci 70 può essere effettuato a livello industriale lavorando una intera fetta ("wafer") di materiale semiconduttore, su cui vengono realizzati una pluralità di attuatori 10 e/o dispositivi diagnostici 50 e/o dispositivi per il rilascio controllato di farmaci 70 del tipo precedentemente descritto. In questo caso, al termine delle fasi di fabbricazione, si procede con il taglio del wafer in singoli chip e all'impacchettamento ("packaging") dei chip.

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

L'attuatore integrato secondo la presente invenzione consente di gestire flussi di liquidi estremamente ridotti.

Inoltre, per la semplicità di fabbricazione, l'attuatore secondo la presente invenzione è estremamente economico, rendendolo adatto a dispositivi di tipo usa e getta ("disposable").

Inoltre, grazie all'elevato livello di integrazione e all'utilizzo di materiali biocompatibili, l'attuatore descritto può essere utilizzato in micro-dispositivi

impiantabili per applicazioni biomediche, anche in dispositivi impiantabili.

Infine, l'utilizzo di un elemento di nucleo 18 disposto internamente e planarmente all'avvolgimento 14, consente di generare elevati campi magnetici anche nel caso di basse correnti applicate all'avvolgimento 14. Questo consente allo stesso tempo un notevole risparmio di energia, un ridotto riscaldamento dell'avvolgimento 14 per effetto Joule, e un considerevole risparmio in termini di area occupata. Infatti, la richiedente ha verificato che, a parità di intensità di campo magnetico generato, la soluzione che prevede un avvolgimento 14 provvisto di un elemento di nucleo 18 secondo la presente invenzione richiede la fabbricazione di un avvolgimento 14 di dimensioni notevolmente inferiori rispetto ad un avvolgimento 14 privo dell'elemento di nucleo 18.

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

Ad esempio, l'elemento passivo 26 può essere disposto al di sotto dello strato di copertura 24 e solidale con esso. Alternativamente, lo strato di copertura 24 stesso può comprendere materiale ferromagnetico. In questo ultimo

caso, lo strato di copertura 24 e l'elemento passivo 26 coincidono.

Inoltre, le spire dell'avvolgimento 14 e l'elemento di nucleo 18 possono non essere complanari, ma essere disposti su piani diversi (cioè sono realizzati su diversi strati metallici).

Inoltre, come mostrato in figura 16, può essere previsto un guscio 90 di materiale ferromagnetico (ad esempio dello stesso materiale dell'elemento di nucleo 18) circondante su tutti o su alcuni lati l'avvolgimento 14, all'interno del primo strato strutturale 12 e/o al di sopra dello strato di copertura 24, lateralmente all'elemento passivo 26. L'elemento di nucleo 18 si estende all'interno del primo strato strutturale 12 fino a contattare tale guscio 90. L'avvolgimento 14 è comunque elettricamente isolato dal guscio 90 da porzioni del primo strato strutturale 12 comprese tra il guscio 90 e l'avvolgimento 14. Questa forma di realizzazione ha il vantaggio di aumentare il valore del campo magnetico applicato all'elemento passivo 26 a parità di condizioni rispetto alla forma di realizzazione di figura 2.

Infine, l'attuatore descritto secondo la presente invenzione può essere utilizzato per applicazioni diverse da quelle di micro-pompa. Ad esempio può essere utilizzato, quando necessario, per restringere un canale riducendo la

quantità di fluido che scorre in tale canale e aumentandone allo stesso tempo localmente la pressione. Inoltre, l'attuatore secondo la presente invenzione può essere utilizzato come micro-valvola, per interrompere e abilitare alternativamente un flusso di un liquido in un canale.

## RIVENDICAZIONI

1. Attuatore elettromagnetico integrato (10) comprendente:

- un primo strato strutturale (12);
- una membrana flessibile (27) estendentesi al di sopra del primo strato strutturale (12) e comprendente regioni di materiale ferromagnetico;
- una camera (20), delimitata fra il primo strato strutturale (12) e la membrana flessibile (27);
- un avvolgimento (14) comprendente una pluralità di spire di materiale conduttivo, estendentesi all'interno del primo strato strutturale (12); e
- un elemento di nucleo (18) di materiale ferromagnetico, estendentesi all'interno del primo strato strutturale, internamente all'avvolgimento (14).

2. Attuatore secondo la rivendicazione 1, comprendente inoltre un substrato (11) avente una prima faccia (11a) ed una seconda faccia (11b) opposte tra loro, il primo strato strutturale (12) essendo formato sulla prima faccia (11a) del substrato (11).

3. Attuatore secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui le spire dell'avvolgimento 14 e l'elemento di nucleo (18) sono tra loro complanari.

4. Attuatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui la membrana (27)

comprende uno strato di copertura (24) e un elemento passivo (26) di materiale ferromagnetico, solidale allo strato di copertura (24), l'attuatore comprendendo inoltre un secondo strato strutturale (22) estendentesi fra il primo strato strutturale (12) e la membrana flessibile (27) e delimitante lateralmente la camera (20).

5. Attuatore secondo la rivendicazione 4, in cui l'elemento di nucleo (18), la camera (20), e l'elemento passivo (26) giacciono su piani paralleli tra loro e sono sostanzialmente verticalmente allineati.

6. Attuatore secondo la rivendicazione 4 o 5, in cui lo strato di copertura (24) è di un materiale scelto nel gruppo comprendente: un elastomero, un materiale plastico, resist, materiale semiconduttore, ossido di silicio, silicio.

7. Attuatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 4-6, in cui l'elemento di nucleo (18) e l'elemento passivo (26) sono di un materiale scelto tra: nichel, cobalto, ferro, o una miscela di essi.

8. Attuatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 2-7, in cui l'avvolgimento (14) comprende una coppia di estremità (14', 14''), l'attuatore comprendendo inoltre un generatore di corrente (19) integrato nel substrato (11) elettricamente accoppiato alle estremità (14', 14'') dell'avvolgimento (14).

9. Attuatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 4-8, in cui la camera (20) ha forma scelta nel gruppo comprendente quadrangolare, circolare, poligonale, poligonale ad angoli smussati e si estende per l'intero spessore del secondo strato strutturale (22).

10. Attuatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui la camera (20) ha una profondità compresa tra 1  $\mu\text{m}$  e 1000  $\mu\text{m}$ , preferibilmente pari a 10  $\mu\text{m}$ .

11. Attuatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detto substrato (11) è di materiale semiconduttore e il primo strato strutturale (12) è di materiale dielettrico.

12. Dispositivo microfluidico (50; 70) comprendente:

- un foro di ingresso (54);
- un foro di uscita (56);
- un canale (53; 74) formante un percorso fluidico con il foro di ingresso e il foro di uscita;

- una prima micro-pompa (10a) disposta sul percorso fluidico e comprendente l'attuatore elettromagnetico (10) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 9.

13. Dispositivo secondo la rivendicazione 12, in cui detto canale (53; 74) alloggia almeno una regione di rilevamento (52) comprendente molecole sonda ("probe molecules") fissate al primo strato strutturale (12)

internamente al canale (53; 74) e atte a rilevare rispettive molecole target.

14. Dispositivo secondo la rivendicazione 12 o 13, comprendente una seconda e una terza micro-pompa (10b, 10c) comprendenti un rispettivo attuatore elettromagnetico (10) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 9, la prima, la seconda e la terza micro-pompa (10a, 10b, 10c) essendo configurate per operare come una pompa peristaltica a tre fasi.

15. Procedimento di fabbricazione di un attuatore elettromagnetico (10), comprendente le fasi di:

- formare un primo strato strutturale (12);
- formare una membrana flessibile (27), comprendente regioni di materiale ferromagnetico, al di sopra del primo strato strutturale (12);
- formare, tra il primo strato strutturale (12) e la membrana flessibile (27), una camera (20);
- formare un avvolgimento (14), avente una pluralità di spire di materiale conduttivo, all'interno del primo strato strutturale (12) ;
- formare un elemento di nucleo (18), di materiale ferromagnetico, internamente all'avvolgimento (14).

16. Procedimento secondo la rivendicazione 15, comprendente inoltre la fase di:

- disporre ("providing") un substrato (11) avente una

prima faccia (11a) e una seconda faccia (11b) opposte tra loro,

la fase di formare il primo strato strutturale (12) comprendendo inoltre formare il primo strato strutturale (12) sulla prima faccia (11a) del substrato (11).

17. Procedimento secondo la rivendicazione 15 o 16, in cui le fasi di formare l'avvolgimento (14) e l'elemento di nucleo (18) comprendono inoltre formare l'avvolgimento (14) e l'elemento di nucleo (18) complanari tra loro.

18. Procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 15-17, in cui la fase di formare lo strato di membrana (27) comprende:

- formare un secondo strato strutturale (22) al di sopra del primo strato strutturale (12);

- formare uno strato di copertura (24) al di sopra del e in contatto con il secondo strato strutturale (22); e

- formare un elemento passivo (26), di materiale ferromagnetico, solidale allo strato di copertura (24).

19. Procedimento secondo la rivendicazione 18, in cui le fasi di formare l'elemento di nucleo (18), la camera (20), e l'elemento passivo (26) comprendono formare l'elemento di nucleo (18), la camera (20), e l'elemento passivo (26) sostanzialmente verticalmente allineati e giacenti su rispettivi piani paralleli tra loro sono.

20. Procedimento secondo la rivendicazione 18 o 19, in

cui la fase di formare lo strato di copertura (24) comprende disporre ("providing") un materiale scelto nel gruppo comprendente: un elastomero, un materiale plastico, resist, materiale semiconduttore, ossido di silicio, silicio.

21. Procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 18-20, in cui la fase di formare l'elemento di nucleo (18) e l'elemento passivo (26) comprende depositare un materiale scelto tra: nichel, cobalto, ferro, o una miscela di essi.

22. Procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 16-21, in cui la fase di formare l'avvolgimento (14) comprende formare una coppia di estremità (14', 14'') a capi opposti dell'avvolgimento (14), il procedimento comprendendo inoltre la fase di formare un generatore di corrente (19) integrato nel substrato 11 ed elettricamente accoppiato alle estremità (14', 14'') dell'avvolgimento (14).

23. Procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 18-22, in cui la fase di formare il primo strato strutturale (22) comprende crescere termicamente e/o depositare ossido di silicio.

24. Metodo di movimentazione di un liquido in un dispositivo integrato (50; 73) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 12-14, il metodo comprendendo le fasi di:

- alimentare una corrente all'avvolgimento (14);
- generare un campo magnetico ( $B_{tot}$ ) attraversante l'elemento di nucleo (18); e
- deformare la membrana flessibile (27) verso il primo strato strutturale (12).

25. Metodo secondo la rivendicazione 24, in cui la fase di deformare comprende portare la membrana flessibile (27) a contatto con il primo strato strutturale (12) in modo da isolare fluidicamente reciprocamente due porzioni della camera (20).

26. Metodo secondo la rivendicazione 24 o 25, in cui il dispositivo integrato (50; 73) comprende una seconda (10b) ed una terza (10c) micro-pompa formate ciascuna da un rispettivo attuatore elettromagnetico integrato (10) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1-9, dette prima, seconda e terza micro-pompa (10a, 10b, 10c) essendo comandate in modo che da chiudere sequenzialmente una rispettiva camera (20) lungo il percorso fluidico.

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

**Lorenzo NANNUCCI**

CLAIMS

1. An integrated electromagnetic actuator (10) comprising:  
- a first structural layer (12);  
5 - a flexible membrane (27), extending over the first structural layer (12) and comprising regions of ferromagnetic material;  
- a chamber (20), delimited between the first structural layer (12) and the flexible membrane (27);  
10 - a winding (14), comprising a plurality of turns of conductive material, extending within the first structural layer (12); and  
- a core element (18) of ferromagnetic material, extending within the first structural layer, inside the winding (14).
- 15
2. The actuator according to claim 1, further comprising a substrate (11) having a first face (11a) and a second face (11b) opposite to one another, the first structural layer (12) being formed on the first face (11a) of the substrate (11).
- 20
3. The actuator according to claim 1 or claim 2, wherein the turns of the winding (14) and the core element (18) are coplanar.
- 25
4. The actuator according to any one of the preceding claims, wherein the membrane (27) comprises a cover layer (24) and a passive element (26) made of ferromagnetic material, fixed with respect to the cover layer (24), the actuator further comprising a second structural layer (22) extending between  
30 the first structural layer (12) and the flexible membrane (27) and laterally delimiting the chamber (20).
5. The actuator according to claim 4, wherein the core element (18), the chamber (20), and the passive element (26) lie in

planes parallel with respect to one another and are substantially vertically aligned.

5 6. The actuator according to claim 4 or claim 5, wherein the cover layer (24) is made of a material chosen in the group comprising: an elastomer, a plastic material, photoresist, semiconductor material, silicon oxide, silicon.

10 7. The actuator according to any one of claims 4-6, wherein the core element (18) and the passive element (26) are made of a material chosen from amongst: nickel, cobalt, iron, or a mixture thereof.

15 8. The actuator according to any one of claims 2-7, wherein the winding (14) comprises a pair of ends (14', 14"), the actuator further comprising a current generator (19) integrated in the substrate (11) electrically coupled to the ends (14', 14") of the winding (14).

20 9. The actuator according to any one of claims 4-8, wherein the chamber (20) has a shape chosen in the group comprising a quadrangular shape, a circular shape, a polygonal shape, and a polygonal shape with rounded corners and extends throughout the thickness of the second structural layer (22).

25 10. The actuator according to any one of the preceding claims, wherein the chamber (20) has a depth of between 1  $\mu\text{m}$  and 1000  $\mu\text{m}$ , preferably 10  $\mu\text{m}$ .

30 11. The actuator according to any one of the preceding claims, wherein said substrate (11) is made of semiconductor material and the first structural layer (12) is made of dielectric material.

12. A microfluidic device (50; 70) comprising:

- an inlet hole (54);
- an outlet hole (56);
- a channel (53; 74), forming a fluidic path with the inlet hole and the outlet hole; and
- a first micropump (10a), arranged on the fluidic path and comprising the electromagnetic actuator (10) according to any one of claims 1 to 9.

10 13. The device according to claim 12, wherein said channel (53; 74) houses at least one detection region (52) comprising probe molecules fixed to the first structural layer (12) inside the channel (53; 74) and adapted to detect respective target molecules.

15 14. The device according to claim 12 or claim 13, comprising a second micropump (10b) and a third micropump (10c) including a respective electromagnetic actuator (10) according to any one of claims 1 to 9, the first, second, and third micropumps (10a, 10b, 10c) being configured for operating as a three-phase peristaltic pump.

15. A process for manufacturing an electromagnetic actuator (10), comprising the steps of:

- 25 - forming a first structural layer (12);
- forming a flexible membrane (27), comprising regions of ferromagnetic material, over the first structural layer (12);
  - forming a chamber (20) between the first structural layer (12) and the flexible membrane (27);
- 30 - forming a winding (14), having a plurality of turns of conductive material, within the first structural layer (12);
- and
- forming a core element (18), made of ferromagnetic material, within the winding (14).

16. The process according to claim 15, further comprising the step of:

- providing a substrate (11) having a first face (11a) and a second face (11b) opposite to one another,
- 5 the step of forming the first structural layer (12) further comprising forming the first structural layer (12) on the first face (11a) of the substrate (11).

10 17. The process according to claim 15 or claim 16, wherein the steps of forming the winding (14) and the core element (18) further comprise forming the winding (14) and the core element (18) coplanar with one another.

15 18. The process according to any one of claims 15-17, wherein the step of forming the membrane layer (27) comprises:

- forming a second structural layer (22) on top of the first structural layer (12);
  - forming a cover layer (24) on top of and in contact with the
- 20 second structural layer (22); and
- forming a passive element (26), of ferromagnetic material, fixed with respect to the cover layer (24).

19. The process according to claim 18, wherein the steps of

25 forming the core element (18), the chamber (20), and the passive element (26) comprise forming the core element (18), the chamber (20), and the passive element (26) substantially vertically aligned and lying in respective planes parallel with respect to one another.

30 20. The process according to claim 18 or claim 19, wherein the step of forming the cover layer (24) comprises providing a material chosen in the group comprising: an elastomer, a plastic material, a resist, a semiconductor material, silicon

oxide, and silicon.

21. The process according to any one of claims 18-20, wherein the step of forming the core element (18) and the passive  
5 element (26) comprises depositing a material chosen from among: nickel, cobalt, iron, or a mixture thereof.

22. The process according to any one of claims 16-21, wherein the step of forming the winding (14) comprises forming a pair  
10 of ends (14', 14'') at opposite terminals of the winding (14), the method further comprising the step of forming a current generator (19) integrated in the substrate (11) and electrically coupled to the ends (14', 14'') of the winding (14).

15 23. The process according to any one of claims 18-22, wherein the step of forming the first structural layer (22) comprises thermally growing and/or depositing silicon oxide.

20 24. A method for displacing a liquid in an integrated device (50; 73) according to any one of claims 12-14, the method comprising the steps of:

- supplying a current to the winding (14);
- generating a magnetic field ( $B_{tot}$ ) traversing the core  
25 element (18); and
- deforming the flexible membrane (27) towards the first structural layer (12).

30 25. The method according to claim 24, wherein the step of deforming comprises bringing the flexible membrane (27) into contact with the first structural layer (12) so as to fluidically isolate the two portions of the chamber (20) from one another.

26. The method according to claim 24 or claim 25, wherein the integrated device (50; 73) comprises a second micropump (10b) and a third micropump (10c), each formed by a respective integrated electromagnetic actuator (10) according to any one of claims 1-9, said first, second, and third micropumps (10a, 10b, 10c) being controlled so as to close a respective chamber (20) sequentially along the fluidic path.

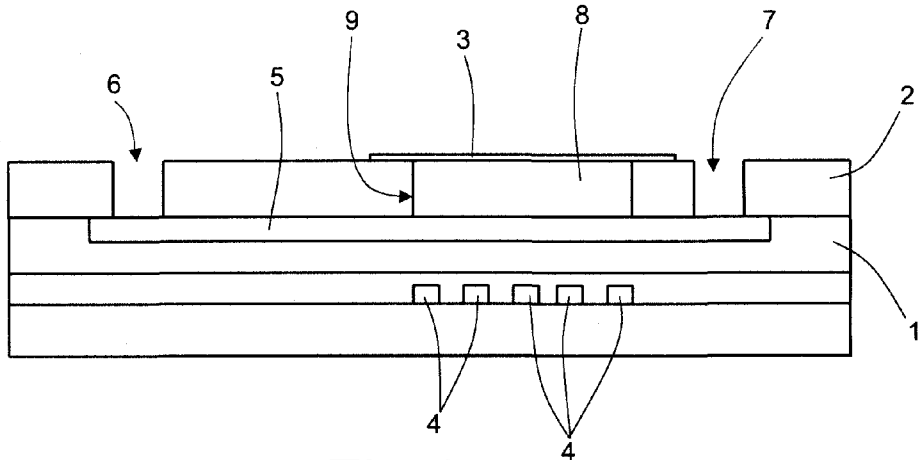


Fig.1

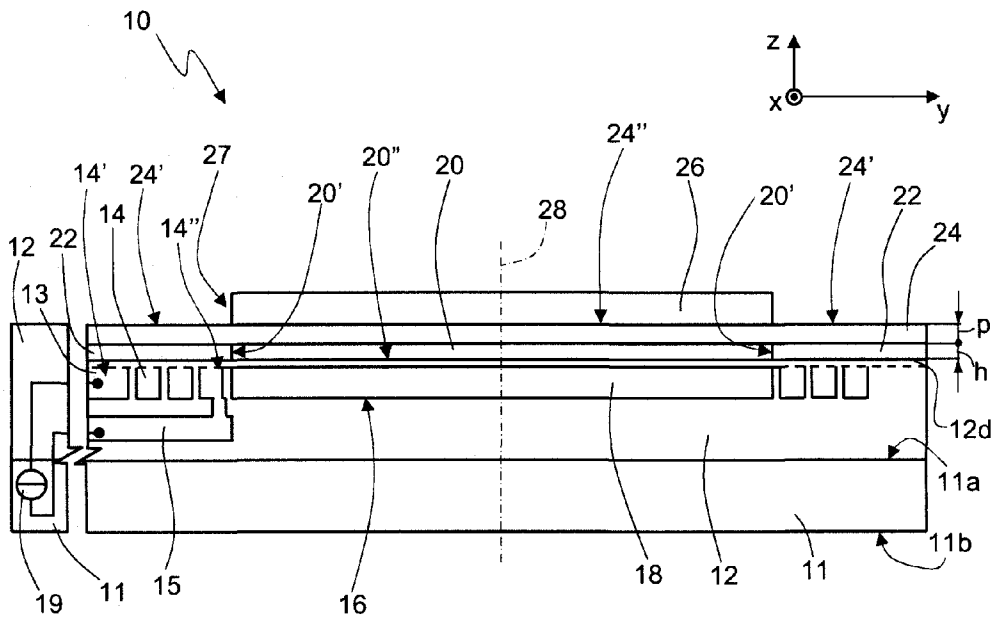


Fig.2

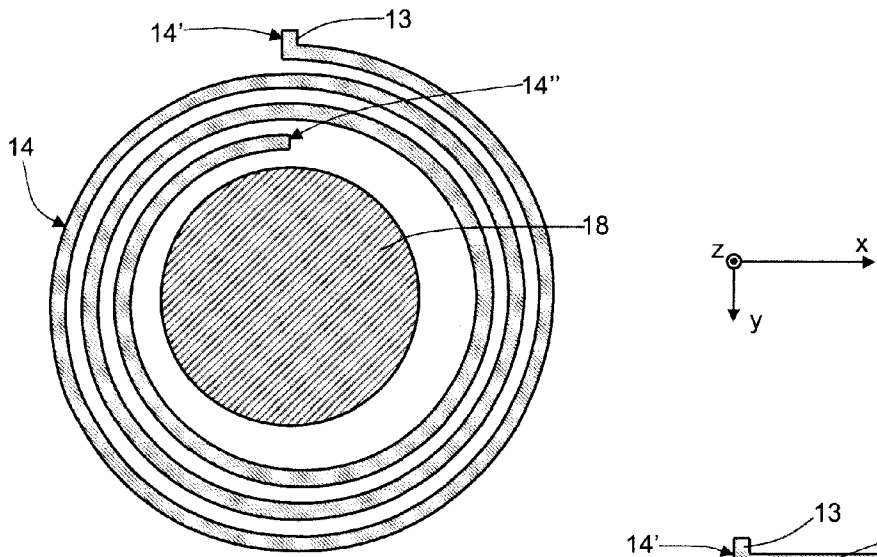


Fig.3a

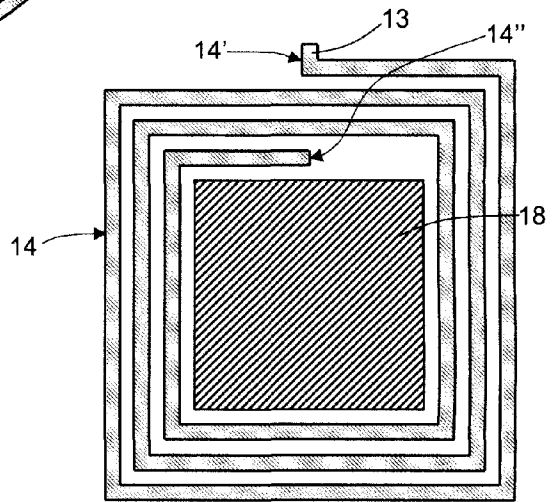


Fig.3b

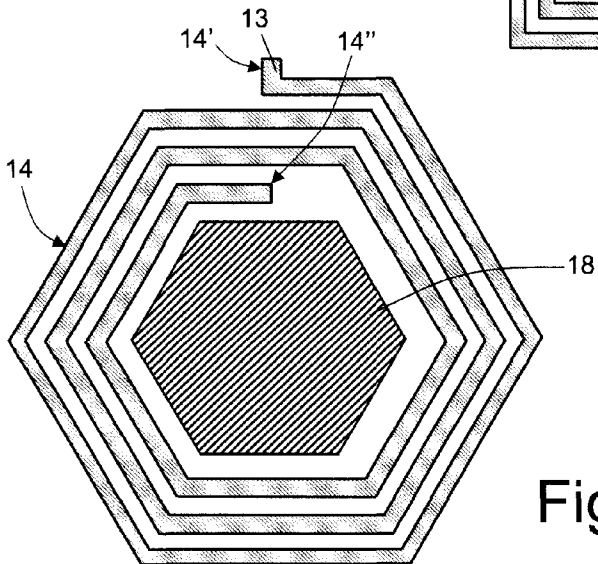


Fig.3c

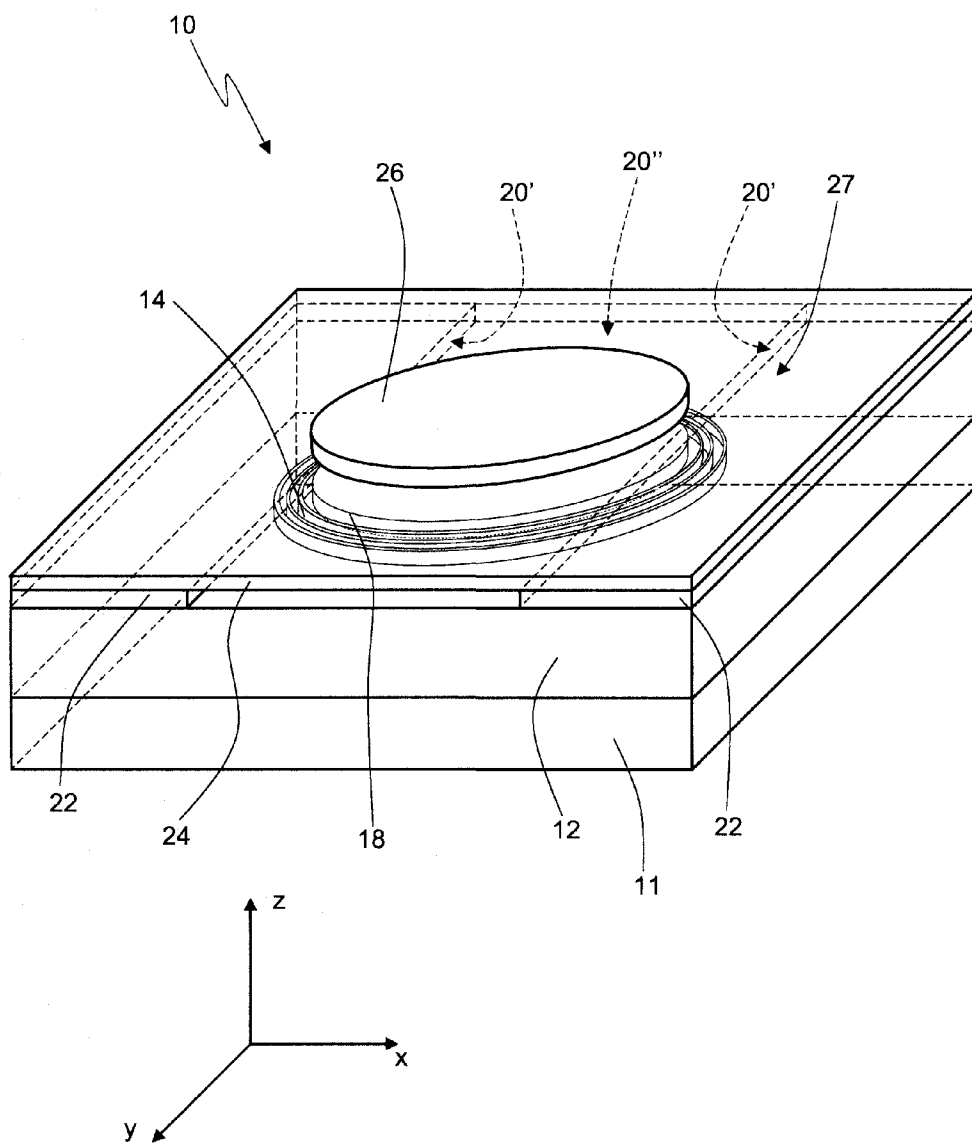


Fig.4

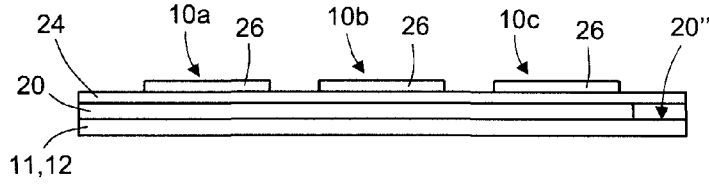
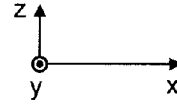


Fig.5a

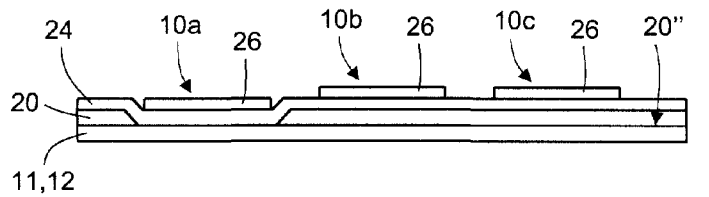


Fig.5b

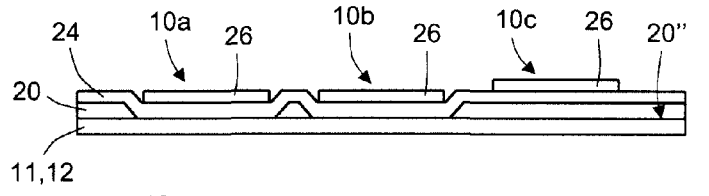


Fig.5c

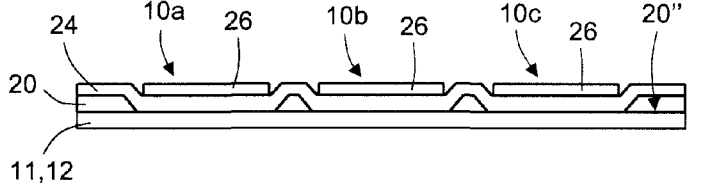


Fig.5d

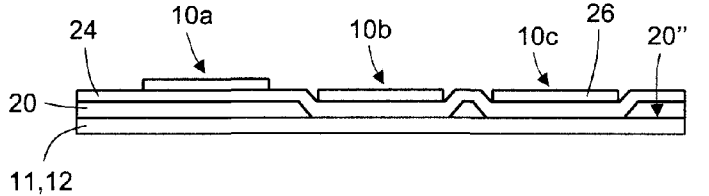


Fig.5e

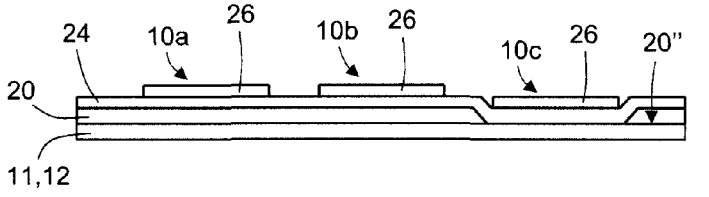


Fig.5f

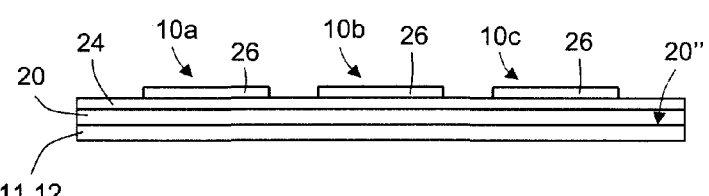
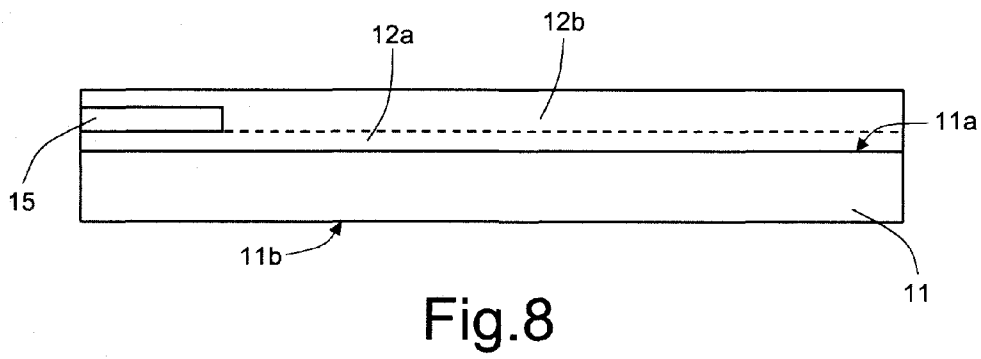
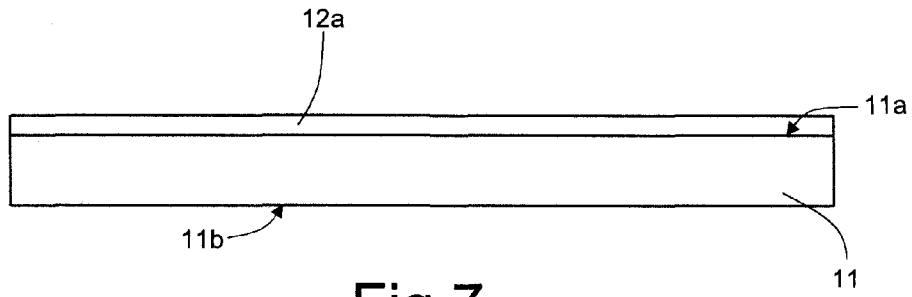
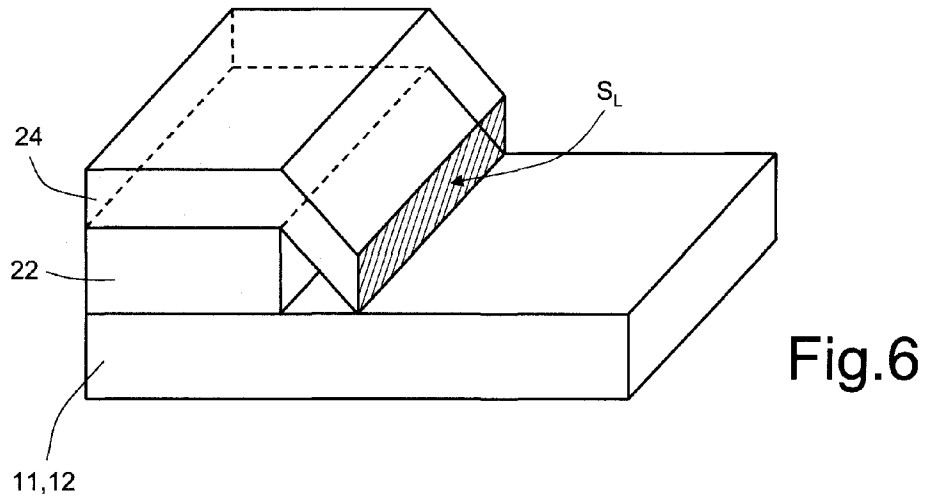


Fig.5g



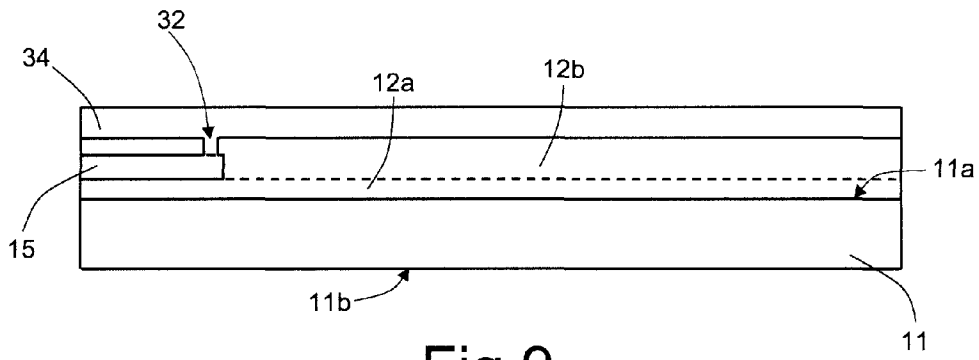


Fig.9

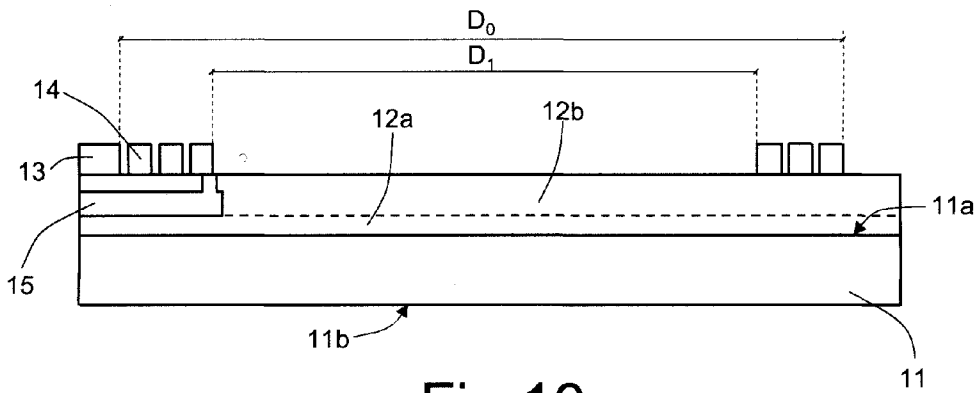


Fig.10

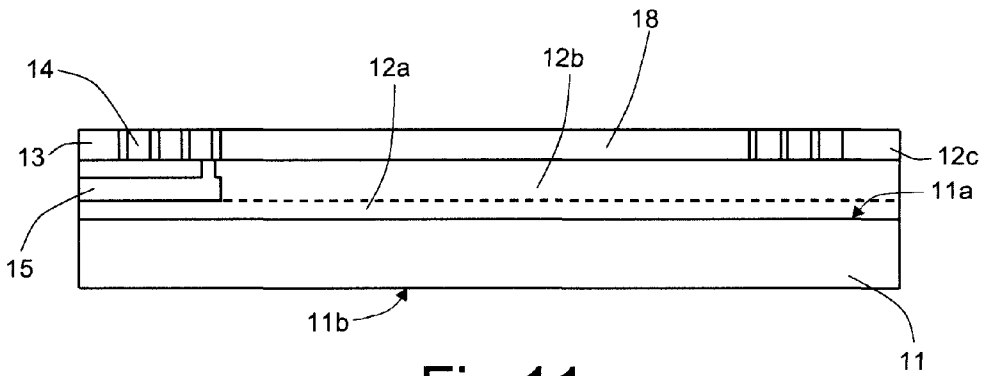


Fig.11

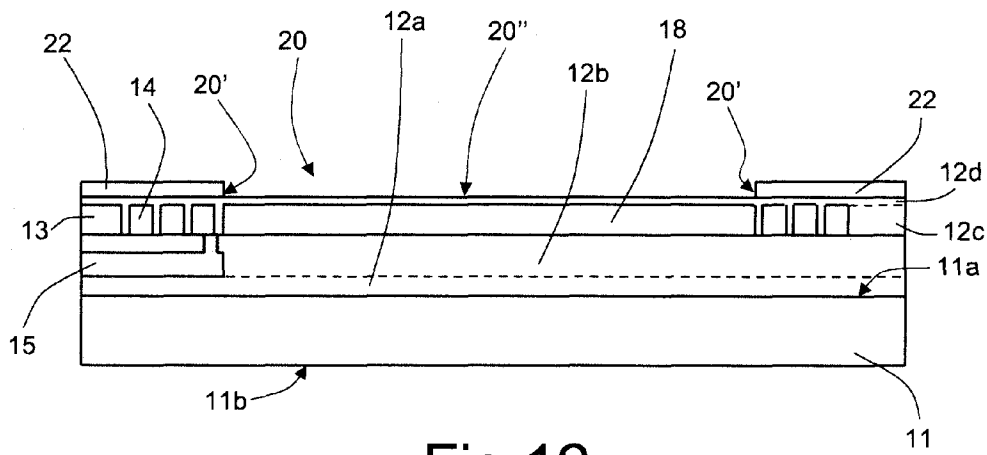


Fig.12

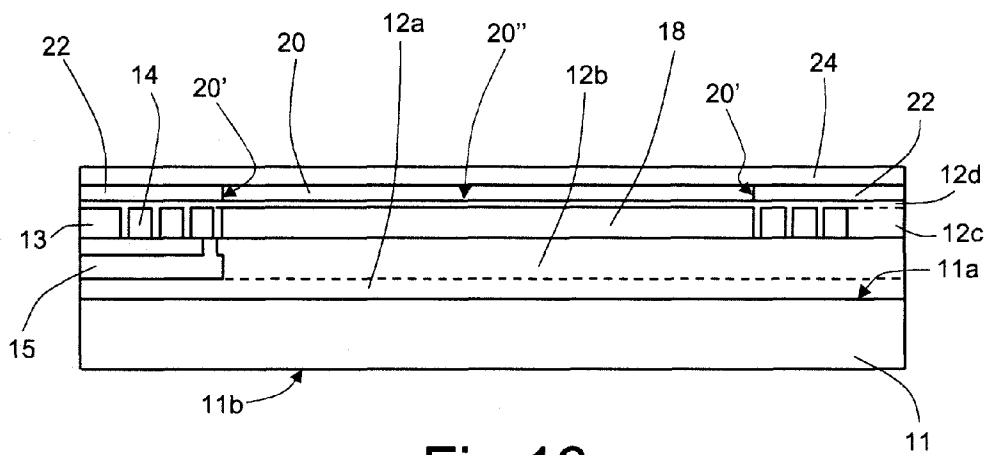


Fig.13

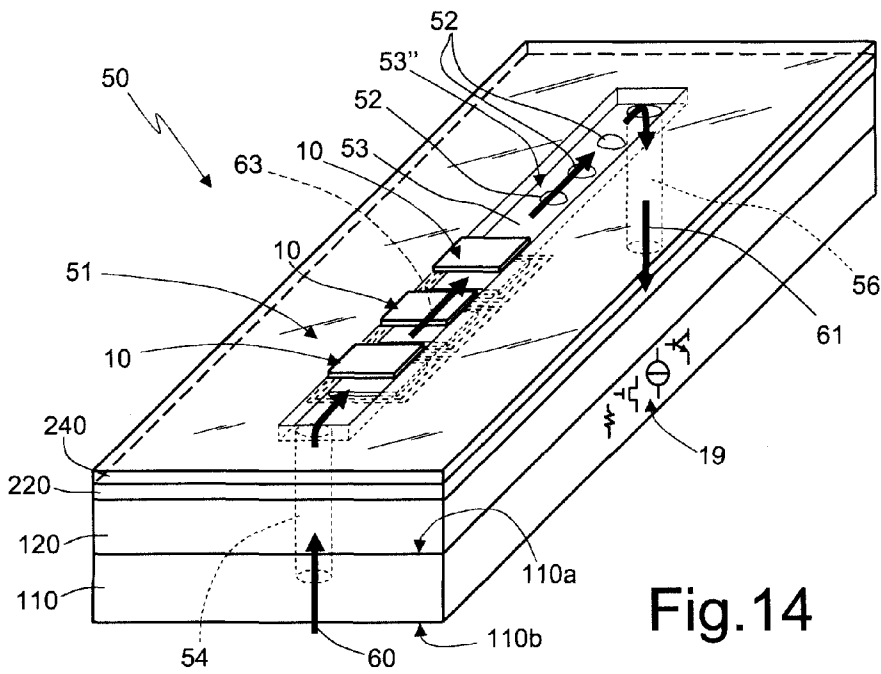


Fig.14

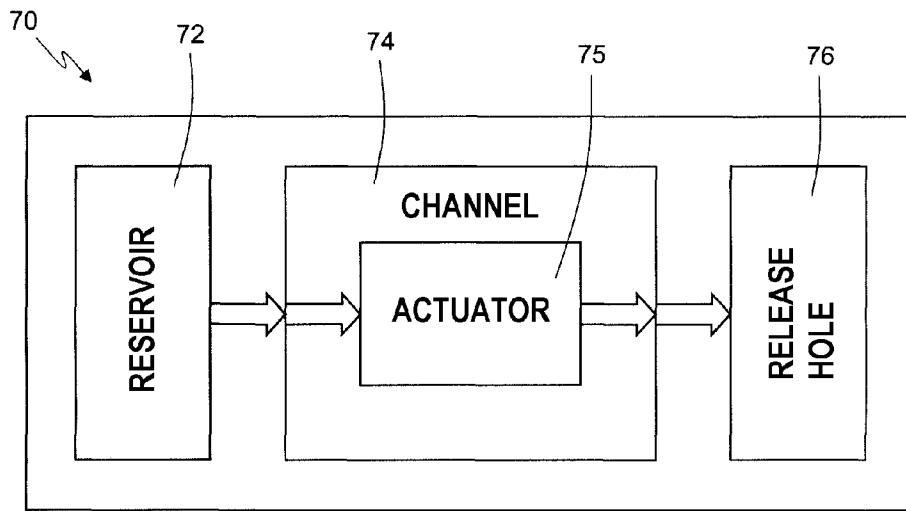


Fig.15

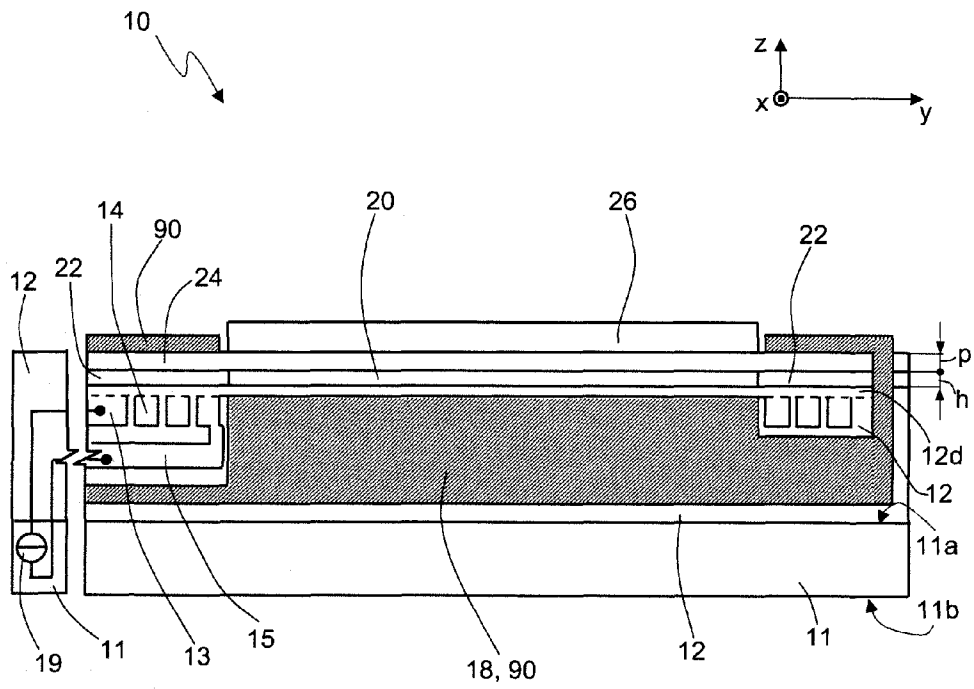


Fig.16