

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102012902067827A1

Publication Date

20140111

Applicant

STMICROELECTRONICS S.R.L.

Title

SENSORE MAGNETORESISTIVO INTEGRATO MULTISTRATO E RELATIVO
METODO DI FABBRICAZIONE

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"SENSORE MAGNETORESISTIVO INTEGRATO MULTISTRATO E RELATIVO
METODO DI FABBRICAZIONE"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI, 2

AGRATE BRIANZA (MB)

Inventori: PACI Dario, ZERBINI Sarah, VIGNA Benedetto

La presente invenzione è relativa ad un sensore magnetoresistivo integrato multistrato e al relativo metodo di fabbricazione, più in particolare ad un sensore di campo magnetico comprendente elementi magnetoresistivi anisotropi.

Sensori di campo magnetico di tipo AMR ("anisotropic magnetoresistance"), sono utilizzati in una pluralità di applicazioni e sistemi, ad esempio in bussole, in sistemi di rilevamento di materiali ferromagnetici, nel rilevamento di correnti, e in svariate altre applicazioni, grazie alla loro capacità di rilevare campi magnetici naturali (ad esempio il campo magnetico terrestre) e campi magnetici generati da componenti elettrici (quali dispositivi elettrici o elettronici e linee percorse da corrente elettrica).

In modo noto, il fenomeno della magnetoresistività anisotropa si verifica all'interno di particolari materiali ferromagnetici, che, quando sottoposti ad un campo magnetico esterno, subiscono una variazione di resistività in funzione delle caratteristiche del campo magnetico applicato. Solitamente, tali materiali vengono sagomati in sottili strisce ("stripes") in modo da formare elementi resistivi, e gli elementi resistivi così formati vengono collegati elettricamente tra loro a formare una struttura a ponte (tipicamente un ponte di Wheatstone).

È noto inoltre realizzare sensori magnetici AMR con tecniche standard di microfabbricazione dei semiconduttori, come descritto ad esempio in US 4,847,584. In particolare, ciascun elemento magnetoresistivo può essere formato da un film di materiale magnetoresistivo, quale ad esempio il Permalloy (una lega ferromagnetica contenente ferro e nichel), depositato a formare una sottile striscia su un substrato di materiale semiconduttore, ad esempio silicio.

Quando una corrente elettrica viene fatta scorrere attraverso un elemento magnetoresistivo, l'angolo θ tra la direzione di magnetizzazione di tale elemento magnetoresistivo e la direzione del flusso della corrente influenza il valore effettivo di resistività dello stesso elemento magnetoresistivo, così che, al variare del valore dell'angolo θ , varia il valore di resistenza elettrica (in

dettaglio, tale variazione segue una legge del tipo $\cos^2\theta$). Ad esempio, una direzione di magnetizzazione parallela alla direzione del flusso di corrente risulta in un valore di resistenza al passaggio di corrente attraverso l'elemento magnetoresistivo massimo, mentre una direzione di magnetizzazione ortogonale alla direzione del flusso di corrente risulta in un valore di resistenza al passaggio di corrente attraverso l'elemento magnetoresistivo minimo.

I sensori magnetici AMR includono inoltre una pluralità di bobine integrate negli stessi sensori (tipicamente due bobine), cosiddette "set/reset strap" e "offset strap", e atte a generare, quando percorse da una corrente di valore opportuno, un campo magnetico che si accoppia perpendicolarmente alla direzione di rilevamento dei sensori e, rispettivamente, lungo la direzione di rilevamento dei sensori; a questo riguardo, si veda ad esempio US 5,247,278.

La bobina di set/reset ha la funzione di variare, alternandolo, il verso di magnetizzazione degli elementi magnetoresistivi lungo una prima direzione predefinita (cosiddetto "easy axis" o EA). In uso, la variazione del verso di magnetizzazione è ottenuto applicando all'elemento magnetoresistivo, tramite la bobina di set/reset, un campo magnetico di valore opportuno per un breve periodo di tempo, tale da forzare arbitrariamente il verso dei dipoli

magnetici dell'elemento magnetoresistivo lungo la prima direzione predefinita (operazione di "set"), e, in seguito, applicando all'elemento magnetoresistivo un secondo campo magnetico, analogo al precedente ma con verso opposto, in modo da forzare il verso dei dipoli magnetici dell'elemento magnetoresistivo ancora lungo la prima direzione predefinita, ma con verso opposto (operazione di "reset"). Le operazioni di set e reset hanno la funzione di portare ciascun elemento magnetoresistivo del sensore AMR in un rispettivo stato di unico dominio ("single domain state") prima di operare il sensore AMR, ad esempio al fine di effettuare operazioni di rilevamento ("sensing") di un campo magnetico esterno. Le operazioni di set e reset sono necessarie in quanto solo nello stato di unico dominio le proprietà fondamentali di linearità, sensitività ("sensitivity"), e stabilità degli elementi magnetoresistivi sono controllate e ripetibili. Le operazioni di set e reset summenzionate sono note e descritte in dettaglio ad esempio nel documento US 5,247,278.

La bobina di offset è solitamente utilizzata per operazioni di compensazione dell'offset presente nel sensore AMR (a causa di mismatch nei valori dei relativi componenti elettrici), operazioni di self-test, e/o operazioni di calibrazione del sensore AMR. In particolare,

Simone BERTOLOTTO
(Iscrizione Albo nr. 1422/B)

il valore delle grandezze elettriche in uscita dal sensore AMR sono, in presenza della bobina di offset, funzione sia del campo magnetico esterno da rilevare, sia del campo magnetico generato per effetto di una corrente circolante nella bobina di offset. La bobina di offset è formata da spire di materiale conduttivo, ad esempio metallo, disposte sullo stesso substrato su cui sono realizzati gli elementi magnetoresistivi del sensore e la bobina di set/reset (in strati metallici diversi), è elettricamente isolata dagli, e disposta in prossimità degli, stessi elementi magnetoresistivi. Il campo magnetico generato dalla bobina di offset è tale da forzare parzialmente l'orientamento dei dipoli magnetici di ciascun elemento magnetoresistivo lungo una seconda direzione predefinita (cosiddetto "hard axis" o HA), ortogonale alla prima direzione predefinita.

La figura 1 mostra, in vista dall'alto, un layout esemplificativo di un sensore integrato di campo magnetico 1 di tipo noto e comprendente una pluralità di elementi magnetoresistivi, collegati tra loro in modo da formare un ponte di Wheatstone, ad esempio come descritto in US 5,247,278 e US 5,952,825, e fabbricati come ad esempio descritto in US 4,847,584.

Più in particolare, ciascun elemento magnetoresistivo ha una struttura di tipo Barber-Pole. La struttura Barber-Pole per elementi magnetoresistivi è nota. In questo caso,

ciascun elemento magnetoresistivo è formato da una striscia ("strip") di materiale magnetoresistivo (tipicamente una lega di NiFe) su cui sono disposte, in contatto elettrico diretto, elementi conduttori ad elevata conducibilità elettrica (ad esempio di alluminio, rame, argento, o oro). Tali elementi conduttori si estendono trasversalmente all'asse di magnetizzazione spontanea della striscia magnetoresistiva, in particolare sono inclinati di un certo angolo α (tipicamente, $\alpha=45^\circ$) rispetto all'asse di magnetizzazione spontanea della striscia magnetoresistiva.

Il sensore di campo magnetico 1 è formato su un substrato a semiconduttore 2 mediante procedimenti di microfabbricazione di tipo noto. Quattro elementi magnetoresistivi 4, 6, 8, e 10, in forma di strisce di materiale ferromagnetico (ad esempio film sottili depositati comprendenti una lega Ni/Fe), in configurazione "Barber Poles", sono elettricamente collegati tra loro a formare un ponte di Wheatstone. Per ciascun elemento magnetoresistivo 4, 6, 8, 10, le strisce magnetoresistive che lo formano sono connesse in serie tra loro. Con riferimento alla figura 1, gli elementi magnetoresistivi 4, 6, 8, 10 sono interconnessi tra loro e connessi a terminali (o "pads") 21, 22, 23, 24, e 25. Il terminale 21 è collegato all'elemento magnetoresistivo 4 per mezzo di una pista conduttiva 11, e l'elemento magnetoresistivo 4 è

collegato all'elemento magnetoresistivo 6 mediante una porzione conduttiva 16. La porzione conduttiva 16 è elettricamente collegata al terminale 22 mediante una rispettiva pista conduttiva 12. L'elemento magnetoresistivo 6 è quindi collegato all'elemento magnetoresistivo 10 mediante una porzione conduttiva 18, e la porzione conduttiva 18 è elettricamente collegata al terminale 23 mediante una rispettiva pista conduttiva 13. L'elemento magnetoresistivo 10 è interconnesso all'elemento magnetoresistivo 8 mediante una porzione conduttiva 17, e la porzione conduttiva 17 è elettricamente collegata al terminale 24 mediante una rispettiva pista conduttiva 14. Il terminale 25 è collegato all'elemento magnetoresistivo 8 mediante una porzione conduttiva 15.

Si forma in questo modo una struttura a ponte resistivo di Wheatstone che realizza un sensore di campo magnetico 1 sensibile a componenti di campo magnetico aventi direzione perpendicolare alle strisce di materiale ferromagnetico che formano gli elementi magnetoresistivi 4, 6, 8, 10. Il terminale 21 è collegato al terminale 25, per formare un terminale comune in modo da collegare elettricamente l'elemento magnetoresistivo 4 e l'elemento magnetoresistivo 8.

In uso, una tensione di ingresso V_{in} è applicata tra il terminale 22 e il terminale 24. La lettura di tensione

di uscita Vout è effettuata tra il terminale 21 (comune al terminale 25) e il terminale 23.

Con riferimento alla figura 1, il sensore di campo magnetico 1 comprende inoltre una prima striscia di materiale conduttore elettrico estendentesi sul substrato 2 e isolata da quest'ultimo mediante uno strato di materiale dielettrico (non mostrato in dettaglio in figura). Tale prima striscia di materiale conduttore elettrico forma un primo avvolgimento 19, di tipo planare, che si estende su un piano parallelo al piano su cui giacciono gli elementi magnetoresistivi 4, 6, 8, 10, elettricamente isolato dagli elementi magnetoresistivi 4, 6, 8, 10.

Il sensore di campo magnetico 1 comprende inoltre una seconda striscia di materiale conduttore elettrico, estendentesi sul substrato 2, e isolata da quest'ultimo e dal primo avvolgimento 19 mediante uno strato di materiale dielettrico (non mostrato in dettaglio in figura). Tale seconda striscia di materiale conduttore elettrico forma un secondo avvolgimento 20, di tipo planare, che si estende tra un terminale 20a e un terminale 20b su un piano parallelo al piano su cui giacciono gli elementi magnetoresistivi 4, 6, 8, 10 e il primo avvolgimento 19, ed elettricamente isolato dagli elementi magnetoresistivi 4, 6, 8, 10 e dal primo avvolgimento 19.

Il primo avvolgimento 19 è utilizzato quando è

necessario generare un campo magnetico avente intensità nota interagente con il sensore di campo magnetico 1, ad con finalità di polarizzazione, calibrazione, e/o compensazione di eventuali offset dovuti alla presenza di campi magnetici esterni indesiderati. In quest'ultimo caso, l'effetto del campo magnetico generato dal primo avvolgimento 19 sul segnale di uscita Vout del sensore di campo magnetico 1 è quello di bilanciamento del segnale di uscita dovuto esclusivamente al campo esterno non desiderato, al fine di generare un'uscita di segnale zero.

In uso, quando il primo avvolgimento 19 viene percorso da corrente elettrica, viene generato un campo magnetico le cui linee di forza hanno una componente sul piano su cui giacciono gli elementi magnetoresistivi 4, 6, 8, 10, in particolare direzione parallela alla direzione di sensibilità degli elementi magnetoresistivi 4, 6, 8, 10.

A causa della variabilità del processo di fabbricazione degli elementi magnetoresistivi 4, 6, 8, 10, tali elementi magnetoresistivi 4, 6, 8, 10 possono avere caratteristiche strutturali diverse tra loro. Questo genera un segnale di offset Voff, sovrapposto al segnale di uscita utile Vs, intrinseco al sensore di campo magnetico 1, che causa una riduzione della sensibilità del sensore di campo magnetico 1 durante l'uso. Tale segnale di offset Voff può essere eliminato operando opportunamente il secondo

avvolgimento 20. In maggior dettaglio, durante l'uso, vengono fatti scorrere nel secondo avvolgimento 20 impulsi di corrente con direzione opposta tra loro (polarizzando opportunamente i terminali 20a e 20b del secondo avvolgimento), in modo tale da generare rispettivi campi magnetici definiti da rispettive linee di campo aventi verso opposto tra loro. Tali campi magnetici sono di intensità tale da ri-orientare i dipoli magnetici degli elementi magnetoresistivi 4, 6, 8, 10 secondo le linee di campo generate, in particolare con verso definito dal verso delle linee del campo magnetico generato.

In seguito ad un primo impulso di corrente (detto impulso di set) attraverso il secondo avvolgimento 20, viene generato un primo campo magnetico H_{s1} tale da orientare i dipoli magnetici degli elementi magnetoresistivi 4, 6, 8, 10 secondo un primo verso.

In seguito ad un secondo impulso di corrente (detto impulso di reset) attraverso il secondo avvolgimento 20, viene generato un secondo campo magnetico H_{s2} (di intensità, ad esempio, uguale al primo campo magnetico H_{s1}) tale da orientare i dipoli magnetici degli elementi magnetoresistivi 4, 6, 8, 10 in un secondo verso.

La misura effettuata dopo la fase di "set" (segnale prelevato da un'uscita del ponte) è pari a $V_{off} + V_s$, mentre dopo il "reset" si ottiene $V_{off} - V_s$. Facendo la differenza

fra le due misure si cancella l'offset, ottenendo 2Vs.

Il sensore AMR descritto con riferimento alla figura 1 richiede dunque, per essere correttamente operato, almeno due bobine (la bobina di set/reset e la bobina di offset).

La presenza una bobina per le operazioni di set/reset e di una bobina per le operazioni di compensazione degli offset complica il processo di fabbricazione del sensore AMR, e ne aumenta il costo di fabbricazione. Inoltre, anche le dimensioni del sensore così fabbricato non sono ottimizzate.

Gli svantaggi summenzionati sono ancora più evidenti nel caso di sensore a doppio asse ("dual axis") o triplo asse ("three axis"), atto a misurare campi magnetici agenti lungo due o, rispettivamente, 3 assi. In questo caso, infatti, sarebbe necessario disporre almeno un elemento magnetoresistivo per ciascun asse di misura, e disporre una bobina di set/reset ed una bobina di compensazione offset per ciascun elemento magnetoresistivo. Risulta evidente che l'occupazione di area e la difficoltà di fabbricazione sono, in questo caso, un problema ("issue").

Secondo una forma di realizzazione di tipo noto, ad esempio descritta in US6,529,114, per ovviare ai summenzionati inconvenienti, e per ottenere un sensore compatto, viene formata una singola bobina planare avente lungo un primo asse (es., asse X) e porzioni lungo un

secondo asse (es., asse Y) ortogonale al primo asse. Elementi magnetoresistivi sono formati sia in corrispondenza delle porzioni orientate lungo X che delle porzioni orientate lungo Y, così che il sensore magnetoresistivo possa essere utilizzato come sensore biassiale. Tutti gli elementi magnetoresistivi sono complanari e formati durante una stessa fase di deposizione di materiale ferromagnetico. Tale materiale ferromagnetico, prima della definizione delle strip magnetoresistive (film "flat"), ha l'easy axis orientato lungo una direzione, tipicamente formante un angolo di 45° rispetto ad entrambi gli assi di sensibilità dell'elemento ferromagnetico. La forma degli elementi magnetoresistivi, in cui l'estensione L lungo l'easy axis è maggiore dell'estensione W lungo l'hard axis, con $L \gg W$, introduce un "anisotropia di forma" che componendosi con l'anisotropia del materiale (film "flat") tende a portare l'easy axis delle strip sensibili al campo lungo X (che hanno estensione L parallela a Y) lungo Y e l'easy axis delle strip sensibili al campo lungo Y (che hanno estensione L parallela a X) lungo X. In questo modo è possibile operare il sensore come sensore biassiale. Tuttavia, la soluzione ottenuta non è ottimale in quanto ulteriori fasi di compensazione del segnale generato dagli elementi magnetoresistivi sono necessarie a causa del fatto che, per quanto l'anisotropia geometrica orienti l'easy

axis degli elementi magnetoresistivi sensibili al campo lungo X ortogonale all'easy axis degli elementi magnetoresistivi sensibili al campo lungo Y, l'ortogonalità non risulta perfetta a meno di non disporre gli elementi magnetoresistivi ad un angolo di qualche grado superiore ai 90°. Inoltre, un sensore di questo tipo non consente una riduzione delle dimensioni ("scale down") inferiore a circa $0.7 \times 0.7 \text{ mm}^2$.

Scopo della presente invenzione è fornire un sensore magnetoresistivo ed un metodo di fabbricazione dello stesso che siano privi degli inconvenienti dell'arte nota.

Secondo la presente invenzione vengono realizzati un sensore magnetoresistivo ed un metodo di fabbricazione dello stesso, come definiti nelle rivendicazioni allegate.

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 un sensore di campo magnetico di tipo AMR secondo l'arte nota;

- la figura 2 mostra, in vista schematica superiore, un sensore di campo magnetico secondo una forma di realizzazione della presente invenzione;

- la figura 3 mostra, in vista schematica superiore, un generatore di campo magnetico in forma di striscia

conduttiva del sensore di campo magnetico di figura 2;

- la figura 4 mostra porzioni complanari del generatore di campo magnetico di figura 3;

- la figura 5 mostra una ulteriore porzione del generatore di campo magnetico di figura 3, atta ad accoppiare elettricamente le porzioni complanari di figura 4;

- la figura 6 mostra, in vista schematica superiore, un ulteriore generatore di campo magnetico in forma di striscia conduttiva del sensore di campo magnetico di figura 2;

- la figura 7 mostra porzioni complanari del generatore di campo magnetico di figura 6;

- la figura 8 mostra una ulteriore porzione del generatore di campo magnetico di figura 6, atta ad accoppiare elettricamente le porzioni complanari di figura 7;

- le figure 9 e 10 mostrano elementi magnetoresistivi del sensore di campo magnetico di figura 2;

- la figura 11 mostra, in vista in sezione, il sensore di campo magnetico di figura 2, lungo la linea di sezione XI-XI;

- le figure 12a-12d mostrano, in vista in sezione, fasi di fabbricazione del sensore di campo magnetico delle figure 2 e 11;

- la figura 13 mostra, in vista schematica superiore, un sensore di campo magnetico secondo una ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione;

- le figure 14a, 14b mostrano il sensore di figura 13 durante l'uso per le operazione di set/reset e compensazione offset;

- la figura 15a mostra, in vista schematica superiore, un sensore di campo magnetico secondo una ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione;

- la figura 15b mostra, in vista in sezione, il sensore di campo magnetico di figura 15a lungo la linea di sezione XV-XV;

- la figura 16 mostra il sensore di figura 15a durante l'uso per le operazione di set/reset;

- le figure 17a e 17b mostrano, in vista superiore e, rispettivamente, in sezione, un sensore di campo magnetico secondo una ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione;

- le figure 18a e 18b mostrano, in vista superiore e, rispettivamente, in sezione, un sensore di campo magnetico secondo una ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione;

- la figura 19 mostra il layout di una implementazione del sensore di figura 17; e

- la figura 20 mostra una vista in sezione del sensore

di figura 18 lungo la linea di sezione XIX-XIX.

La figura 2 mostra, in vista superiore e in forma schematica, una porzione di un sensore di campo magnetico 30 formato in una fetta ("wafer") 100 comprendente una pluralità di livelli metallici ("metal layers") separati gli uni dagli altri mediante strati dielettrici, secondo una forma di realizzazione della presente invenzione.

Il sensore di campo magnetico 30 è, in particolare, un sensore a doppio asse ("dual axis sensor") atto a rilevare campi magnetici B_{ext1} e B_{ext2} esterni agenti lungo due direzioni perpendicolari tra loro (in particolare, nella rappresentazione di figura 2, lungo gli assi Y e, rispettivamente, X).

Il sensore di campo magnetico 30 comprende un primo generatore di campo magnetico 31 ed un secondo generatore di campo magnetico 32. Il primo generatore di campo magnetico 31 è formato da strisce conduttive planari estendentisi in una pluralità di livelli metallici ("metal layers"), come meglio descritto in seguito, ad esempio con riferimento alle figure 3 e 4. Il secondo generatore di campo magnetico 32 è anch'esso formato da strisce conduttive planari estendentisi in una pluralità di livelli metallici ("metal layers") almeno in parte diversi dai livelli metallici in cui si estende il primo generatore di campo magnetico 31; si vedano ad esempio le figure 6 e 7 e

la relativa descrizione.

Il sensore di campo magnetico 30 comprende inoltre un primo e un secondo elemento magnetoresistivo (o semplicemente magnetoresistori) 33, 34, ciascuno di essi includente una rispettiva struttura Barber Pole. Il primo e il secondo elemento magnetoresistivo 33, 34 si estendono sovrapposti, in vista superiore lungo l'asse Z, a porzioni conduttive 31a, 31b del primo generatore di campo magnetico 31 e, rispettivamente, a porzioni conduttive 32a, 32b del secondo generatore di campo magnetico 32.

Più in dettaglio, gli elementi magnetoresistivi 33, 34 sono disposti sovrapposti al primo e al secondo generatore di campo magnetico 31, 32 in modo tale che un asse di magnetizzazione preferito (in particolare l'easy axis EA) di ciascun rispettivo elemento magnetoresistivo 33, 34 si estende perpendicolarmente alle linee di flusso di un campo magnetico B_1 (cioè l'EA è parallelo all'asse X) generato dalle porzioni conduttive 31a, 31b quando il primo generatore di campo magnetico 31 è percorso da corrente elettrica; e in modo tale che un asse di magnetizzazione secondario (in particolare l'hard axis HA) degli elementi magnetoresistivi 33, 34 si estende perpendicolarmente alle linee di flusso del campo magnetico B_2 (cioè l'HA è parallelo all'asse Y) generato dalle porzioni conduttive 32a, 32b quando il secondo generatore di campo magnetico 32

è percorso da corrente elettrica. In questo modo gli elementi magnetoresistivi 33, 34 sono sottoposti ad una magnetizzazione sia lungo l'easy axis EA (campo magnetico B_2), sia lungo l'hard axis HA (campo magnetico B_1).

Il sensore di campo magnetico 30 comprende inoltre un terzo e un quarto elemento magnetoresistivo (o semplicemente magnetoresistori) 35, 36, ciascuno includente una struttura Barber Pole, e ciascuno di essi estendendosi sovrapposto, in vista superiore lungo l'asse Z, alle porzioni conduttive 32a, 32b del secondo generatore di campo magnetico 32 e alle porzioni conduttive 31a, 31b del primo generatore di campo magnetico 31.

Più in dettaglio, gli elementi magnetoresistivi 35, 36 sono disposti sovrapposti al primo e al secondo generatore di campo magnetico 31, 32 in modo tale che l'asse di magnetizzazione preferito (in particolare l'easy axis EA) di ciascun rispettivo elemento magnetoresistivo 35, 36 si estende perpendicolarmente alle linee di flusso del campo magnetico B_2 (cioè l'EA è parallelo all'asse Y) generato dalle porzioni conduttive 32a, 32b quando il secondo generatore di campo magnetico 32 è percorso da corrente elettrica; e in modo tale che un asse di magnetizzazione secondario (in particolare l'hard axis HA) degli elementi magnetoresistivi 35, 36 si estende perpendicolarmente alle linee di flusso del campo magnetico B_1 (cioè l'HA è

parallelo all'asse X) generato dalle porzioni conduttive 31a, 31b quando il primo generatore di campo magnetico 31 è percorso da corrente elettrica. In questo modo gli elementi magnetoresistivi 35, 36 sono sottoposti ad una magnetizzazione sia lungo l'easy axis EA (campo magnetico B_1), sia lungo l'hard axis HA (campo magnetico B_2).

Il secondo generatore di campo magnetico 32 è configurato per effettuare l'operazione di set/reset del primo e del secondo elemento magnetoresistivo 33, 34 e/o l'operazione di calibrazione/compensazione offset del terzo e del quarto elemento magnetoresistivo 35, 36. Il secondo generatore di campo magnetico 32 può dunque essere operato indifferentemente con finalità di set/reset del primo e del secondo elemento magnetoresistivo 33, 34 (analogamente a quanto descritto con riferimento alla bobina 20 di figura 1) o con finalità di calibrazione in fase di test o compensazione dell'offset del terzo e del quarto elemento magnetoresistivo 35, 36 (analogamente a quanto descritto con riferimento alla bobina 19 di figura 1), o contemporaneamente con entrambe le finalità di set/reset del primo e del secondo elemento magnetoresistivo 33, 34, e calibrazione/compensazione offset del terzo e del quarto elemento magnetoresistivo 35, 36.

In modo analogo, il primo generatore di campo magnetico 31 è configurato per effettuare sia l'operazione

di set/reset del terzo e del quarto elemento magnetoresistivo 35, 36 sia l'operazione di calibrazione/compensazione offset del primo e del secondo elemento magnetoresistivo 33, 34. Il primo generatore di campo magnetico 31 può dunque essere operato indifferentemente con finalità di set/reset del terzo e del quarto elemento magnetoresistivo 35, 36 (analogamente a quanto descritto con riferimento alla bobina 20 di figura 1) o con finalità di calibrazione in fase di test o compensazione dell'offset del primo e del secondo elemento magnetoresistivo 33, 34 (analogamente a quanto descritto con riferimento alla bobina 19 di figura 1), o contemporaneamente con entrambe le finalità di set/reset del terzo e del quarto elemento magnetoresistivo 35, 36, e calibrazione/compensazione offset del primo e del secondo elemento magnetoresistivo 33, 34.

Durante l'uso, gli elementi magnetoresistivi 33-36 vengono polarizzati in modo noto, ad esempio come illustrato nelle figure 9 e 10.

La forma di realizzazione mostrata in figura 2 è esemplificativa e non limitativa della presente invenzione. In particolare, è possibile prevedere un solo elemento magnetoresistivo 33 avente l'easy axis lungo X, ed un solo elemento magnetoresistivo 35 avente l'easy axis lungo Y (ovvero ortogonale a X). In questo caso, gli elementi

magnetoresistivi 34 e 36 non sono presenti. Alternativamente, è possibile prevedere l'utilizzo di otto elementi magnetoresistivi: quattro di essi sono collegati tra loro a formare un ponte di Wheatstone, e sono orientati in modo tale per cui il loro easy axis si estende lungo X; i restanti quattro sono collegati tra loro a formare un ulteriore ponte di Wheatstone, e sono orientati in modo tale per cui il loro easy axis si estende lungo Y (ovvero ortogonale a X).

Con riferimento alle figure 3-5, il secondo generatore di campo magnetico 32 comprende, come detto, due porzioni conduttive 32a, 32b, elettricamente connesse mediante una porzione di collegamento elettrico 32c. Le porzioni conduttive 32a, 32b, mostrate in forma isolata in figura 4, sono complanari. In particolare, le porzioni conduttive 32a, 32b sono di materiale metallico (ad esempio, alluminio, rame, oro, ecc.) e sono formate in uno stesso livello metallico. Ancora più in particolare, anche la porzione di collegamento elettrico 32c, mostrata in forma isolata in figura 5, è di metallo ed è formata in un livello metallico diverso dal livello metallico delle porzioni conduttive 32a, 32b e collegata ad esse mediante vie metalliche ("metallic vias") 39a, 39b.

Ad esempio, le porzioni conduttive 32a, 32b di figura 4 sono realizzate in un quarto livello metallico ML4, e la

porzione di collegamento elettrico 32c di figura 5 è formata in un terzo livello metallico ML3 della fetta ("wafer") 100.

Con riferimento alla figura 3, la porzione conduttiva 32a comprende un primo terminale 32' collegabile ad un rispettivo terminale 35a di un generatore di corrente 35; la porzione conduttiva 32b comprende un secondo terminale 32'' collegabile ad un altro terminale 35b del generatore di corrente 35. In questo modo, in uso, una corrente i_p' è fatta scorrere tra il primo terminale 32' e il secondo terminale 32'', o viceversa.

Ai fini della presente descrizione, la corrente i_p' corrisponde alla corrente di set/reset i_{SR} quando il secondo generatore di campo magnetico 32 è operato al fine di effettuare operazioni di set e reset degli elementi magnetoresistivi 33, 34, ed alla corrente di calibrazione/compensazione offset i_{OFF} quando il secondo generatore di campo magnetico 32 è operato al fine di effettuare operazioni di calibrazione/compensazione offset degli elementi magnetoresistivi 35, 36.

Con riferimento alle figure 6-8, il primo generatore di campo magnetico 31 comprende, come detto, due porzioni conduttive 31a, 31b (mostrate in forma isolata in figura 7), elettricamente connesse mediante una porzione di collegamento elettrico 31c (mostrata in forma isolata in

figura 8). Le porzioni conduttive 31a, 31b sono complanari. In particolare, le porzioni conduttive 31a, 31b sono di materiale metallico (ad esempio, alluminio, rame, oro, ecc.) e sono formate in uno stesso livello metallico diverso dal livello metallico in cui sono formate le porzioni conduttive 32a, 32b del secondo generatore di campo magnetico 32. Ancora più in particolare, anche la porzione di collegamento elettrico 31c è di metallo ed è formata in un livello metallico diverso dal livello metallico delle porzioni conduttive 31a, 31b, e collegata ad esse mediante vie metalliche ("metallic vias") 41a, 41b.

Secondo una forma di realizzazione, le porzioni di collegamento 31c e 32c del primo e, rispettivamente, del secondo generatore di campo magnetico 31, 32, sono formate in uno stesso livello metallico. Ad esempio, le porzioni conduttive 31a, 31b di figura 7 sono realizzate in un secondo livello metallico ML2, e la porzione di collegamento elettrico 31c di figura 8 è formata in un terzo livello metallico ML3 della fetta ("wafer") 100.

Con riferimento alla figura 6, la porzione conduttiva 31a comprende un primo terminale 31' collegabile ad un rispettivo terminale 45a di un generatore di corrente 45; la porzione conduttiva 31b comprende un secondo terminale 31'' collegabile ad un altro terminale 45b del generatore di corrente 45. In questo modo, in uso, una corrente i_p è

fatta scorrere tra il primo terminale 31' e il secondo terminale 31'', o viceversa.

Ai fini della presente descrizione, la corrente i_p'' corrisponde alla corrente di set/reset i_{SR} quando il primo generatore di campo magnetico 31 è operato al fine di effettuare operazioni di set e reset degli elementi magnetoresistivi 35, 36, ed alla corrente di calibrazione/compensazione offset i_{OFF} quando il primo generatore di campo magnetico 31 è operato al fine di effettuare operazioni di calibrazione/compensazione offset degli elementi magnetoresistivi 33, 34.

Come si può notare dalla figura 3, nelle porzioni conduttive 32a, 32b la corrente i_p' scorre lungo una stessa prima direzione (direzione parallela all'asse Y) e con uno stesso verso; analogamente, come si nota dalla figura 6, nelle porzioni conduttive 31a, 31b la corrente i_p'' scorre lungo una stessa seconda direzione (direzione parallela all'asse X) e con uno stesso verso. Le summenzionate prima e la seconda direzione di scorrimento delle correnti i_p' , i_p'' sono tra loro sostanzialmente ortogonali. In questo modo, quando in uso entrambi il primo e il secondo generatore di campo magnetico 31, 32 sono percorsi da una rispettiva corrente i_p'' e i_p' , tutti gli elementi magnetoresistivi 33-36 sono sottoposti ad entrambi i campi magnetici B_1 e B_2 . Selezionando opportunamente il valore di

corrente che fluisce nel primo e nel secondo generatore di campo magnetico 31, 32 è dunque possibile eseguire selettivamente le operazioni di set/reset e compensazione offset solo sul primo e sul secondo elemento magnetoresistivo 33, 34 o, alternativamente, solo sul terzo e sul quarto elemento magnetoresistivo 35, 36.

Ai fini della presente descrizione, le correnti i_p' , i_p'' corrispondono: (i) alla corrente di set/reset i_{SR} quando il rispettivo generatore di campo magnetico 31, 32 è operato al fine di effettuare operazioni di set e/o reset degli elementi magnetoresistivi 35, 36 o, rispettivamente, degli elementi magnetoresistivi 33, 34; (ii) alla corrente di calibrazione/compensazione offset i_{OFF} quando il rispettivo generatore di campo magnetico 31, 32 è operato al fine di effettuare operazioni di calibrazione/compensazione offset degli elementi magnetoresistivi 35, 36 o, rispettivamente, degli elementi magnetoresistivi 33, 34. La differenza nei due casi sta nel valore dell'ampiezza della corrente pilotata: bassa per la calibrazione, alta per il set/reset.

Gli elementi magnetoresistivi 33-36 del sensore di campo magnetico 30 hanno, secondo una forma di realizzazione della presente invenzione, una struttura di tipo Barber-Pole, e sono schematicamente illustrati, in forma isolata, nelle figure 9 e 10. In particolare, la

figura 9 mostra il terzo e il quarto elemento magnetoresistivo 35, 36; e la figura 10 mostra il primo e il secondo elemento magnetoresistivo 33, 34.

Ciascun elemento magnetoresistivo 33-36 è tipicamente formato come una singola striscia di materiale ferromagnetico (ad esempio film sottili depositati comprendenti una lega Ni/Fe), in particolare in configurazione Barber-Pole. Alternativamente, la struttura Barber-Pole può essere omessa.

Gli elementi magnetoresistivi 33-36 sono disposti in livelli metallici della fetta 100 in modo tale da essere elettricamente isolati dal primo e dal secondo generatore di campo magnetico 31, 32, e almeno parzialmente allineati, lungo l'asse Z, al primo e al secondo generatore di campo magnetico 31, 32, e comunque in modo tale da interagire con i campi magnetici B_1 e B_2 generati dalle porzioni 31a, 31b e, rispettivamente, 32a, 32b, dei generatori di campo magnetico 31, 32 quando percorse dalle rispettive correnti i_P'' , i_P' .

Il terzo e il quarto elemento magnetoresistivo 35, 36 di figura 9 sono formati ciascuno da una striscia ("strip") di materiale magnetoresistivo (es., una lega di NiFe), e da elementi ad elevata conducibilità elettrica che realizzano la struttura Barber-Pole. Le strisce di materiale magnetoresistivo si estendono tra un substrato della fetta

100 ed un primo livello metallico, mentre gli elementi ad elevata conducibilità elettrica che realizzano la struttura Barber-Pole si estendono nel primo livello metallico, in contatto elettrico diretto con le rispettive strisce magnetoresistive.

Il primo e il secondo elemento magnetoresistivo 33, 34 di figura 10 sono formati in modo analogo a quanto descritto con riferimento alla figura 9. Ciascun elemento magnetoresistivo 33, 34 è formato da una striscia ("strip") di materiale magnetoresistivo (es., una lega di NiFe), e da elementi ad elevata conducibilità elettrica che realizzano la struttura Barber-Pole. Le strisce di materiale magnetoresistivo si estendono tra il secondo e il terzo livello metallico della fetta 100, e gli elementi ad elevata conducibilità elettrica che realizzano la struttura Barber-Pole si estendono nel terzo livello metallico, in contatto elettrico diretto con le rispettive strisce magnetoresistive.

Con riferimento ad entrambe le figure 9 e 10, si fa notare che ciascun elemento magnetoresistivo 33-36 è di per sé noto, e comprende una porzione di materiale magnetoresistivo (ad esempio, esempio una lega di nichel e ferro, più in particolare, Permalloy) in contatto ohmico con la struttura Barber-Pole, includente elementi conduttori ad elevata conducibilità elettrica (ad esempio

di metallo, quale alluminio, argento, oro, ecc.). Gli elementi conduttori della struttura Barber-Pole sono inclinati di un certo angolo α (tipicamente, $\alpha=45^\circ$) rispetto all'asse di magnetizzazione spontanea dell'elemento magnetoresistivo (indicato in figura mediante il vettore $\underline{M}$). Ciascun elemento magnetoresistivo 33-36 possiede porzioni terminali 33'-36' e 33''-36'' collegabili ad un rispettivo circuito di polarizzazione e lettura 37, 39 di tipo noto (mostrati in linea tratteggiata in figura 9 e figura 10). I circuiti di polarizzazione e lettura 37, 39 sono configurati per generare un flusso di corrente I_M tra i terminali 33'-36' e 33''-36'' dei rispettivi elementi magnetoresistivi e leggere il valore di resistenza degli elementi magnetoresistivi al passaggio della corrente I_M . Per effetto della struttura Barber-Pole, il vettore $\underline{I_M}$ che rappresenta la corrente I_M è orientato in modo tale da presentare un angolo α con il vettore di magnetizzazione $\underline{M}$ di ciascun elemento magnetoresistivo, in situazione di campo lungo l'hard axis nullo (cioè $\underline{M}$ orientato lungo l'easy axis).

Un eventuale campo magnetico esterno, avente una componente di campo perpendicolare all'easy axis EA (e cioè parallela all'hard axis HA), applicato almeno ad un elemento magnetoresistivo, causa una rotazione del vettore di magnetizzazione $\underline{M}$ e una conseguente variazione del

valore dell'angolo α . Questo causa di conseguenza una variazione della resistenza elettrica dell'elemento magnetoresistivo (anche detto effetto magnetoresistivo) ed è rilevabile dal circuito di polarizzazione e lettura acquisendo e analizzando un segnale di uscita prelevato alle porzioni terminali 33'-36' e 33"-36".

La figura 11 mostra una vista in sezione del sensore di campo magnetico 30, secondo una forma di realizzazione della presente invenzione. La sezione di figura 11 è presa lungo la linea di sezione XI-XI di figura 2.

La figura 11 viene ora descritta contestualmente a fasi di fabbricazione secondo le figure 12a-12d per formare il sensore di campo magnetico 30 avente la struttura mostrata in figura 11.

Inizialmente, figura 12a, la fetta 100 comprende un substrato 51, ad esempio di materiale semiconduttore quale silicio, avente una superficie inferiore 51b ed una superficie superiore 51a. Il substrato 51 può essere di tipo precedentemente lavorato, ad esempio può comprendere componenti elettronici 53 formati all'interno di un'area attiva e/o piazzole di contatto elettrico (non mostrate); quindi, dopo il deposito di uno strato dielettrico 54 (elettricamente isolante) sulla superficie superiore 51a del substrato 51, vengono realizzati il terzo e il quarto elemento magnetoresistivo 35, 36, mediante deposito (in

modo di per se noto) di uno strato di materiale magnetoresistivo (ad esempio una lega di NiFe) al di sopra dello strato dielettrico 54, e successivo attacco di tale strato magnetoresistivo per formare strisce magnetoresistive 55, 56 aventi forma e dimensioni desiderate. Quindi, si procede con il deposito di uno strato dielettrico 59, che viene ridotto di spessore fino ad esporre le strisce magnetoresistive 55, 56. Al di sopra delle strisce magnetoresistive 55, 56 esposte, ed in contatto elettrico con esse, viene formato uno strato conduttore, ad esempio di metallo. Una successiva fase di attacco selettivo dello strato conduttore così depositato consente di ottenere una struttura di tipo Barber-Pole 57, 58 precedentemente descritta. Le strisce magnetoresistive 55, 56 e la rispettiva struttura Barber-Pole 57, 58 formano il terzo e, rispettivamente, il quarto elemento magnetoresistivo 35, 36.

Il livello in cui sono formate le strutture Barber-Pole 57, 58 è il primo livello metallico ML1 della fetta 100.

Quindi, figura 11b, viene depositato, al di sopra del terzo e del quarto elemento magnetoresistivo 35, 36, uno strato dielettrico 60, avente spessore compreso tra circa 0.5 μm e 3 μm . In seguito al deposito, lo strato dielettrico 60 viene planarizzato (es., mediante CMP).

Quindi, si procede con una fase di deposito di uno strato conduttore, ad esempio metallo, e con una successiva fase di definizione di tale strato conduttore per formare le porzioni conduttive 31a, 31b del primo generatore di campo magnetico 31. In vista superiore, le porzioni conduttive 31a, 31b così definite hanno forma e disposizione relativa del tipo mostrato in figura 6.

In maggior dettaglio, la porzione conduttiva 31a è una striscia conduttiva avente forma sostanzialmente a U e comprende (si veda la figura 6) una regione 31a' con estensione principale lungo l'asse X parzialmente sovrapposta al terzo e al quarto elemento magnetoresistivo 35, 36, come già mostrato in figura 1, ed una regione 31a'' ricurva che funge da porzione di collegamento elettrico con la porzione conduttiva 31c.

La regione 31a' si estende lungo l'asse X per una lunghezza compresa tra circa 50 μm e 1 mm, e lungo l'asse Y per una lunghezza compresa tra circa 10 μm e 200 μm . La regione 31a'', avendo la sola funzione di collegamento elettrico, ha dimensioni scelte secondo necessità, tali da sostenere ("sustain") la corrente i_p durante l'uso.

Lo spessore, misurato lungo l'asse Z, della porzione conduttiva 31a è compreso tra 1 μm e 5 μm .

La porzione conduttiva 31b è una striscia conduttiva avente una direzione di estensione principale lungo l'asse

X (ad esempio compresa tra $50\text{ }\mu\text{m}$ e 1 mm) ed una direzione di estensione secondaria lungo l'asse Y (ad esempio compresa tra $10\text{ }\mu\text{m}$ e $200\text{ }\mu\text{m}$). Lo spessore lungo l'asse Z della porzione conduttiva 31b è compreso tra $1\text{ }\mu\text{m}$ e $5\text{ }\mu\text{m}$. Inoltre, la porzione conduttiva 31b si estende in modo tale da essere parzialmente sovrapposta al, o in prossimità del, terzo e quarto elemento magnetoresistivo 35, 36, come già mostrato in figura 2.

Il livello in cui sono formate le porzioni conduttive 31a, 31b è il secondo livello metallico ML2 della fetta 100.

Quindi, sempre con riferimento alla figura 11b, si deposita sulla fetta 100, e in particolare al di sopra delle porzioni conduttive 31a e 31b, uno strato dielettrico 62, avente spessore compreso tra $0.5\text{ }\mu\text{m}$ e $3\text{ }\mu\text{m}$. Lo strato dielettrico 62 viene quindi planarizzato.

Quindi, al di sopra dello strato dielettrico 62, vengono realizzati il primo e il secondo elemento magnetoresistivo 33, 34, mediante deposito (in modo di per se noto) di uno strato di materiale magnetoresistivo (ad esempio una lega di NiFe); successivamente, lo strato magnetoresistivo così depositato viene attaccato per formare strisce magnetoresistive 65, 66 aventi forma e dimensioni desiderate. La sezione di figura 12b mostra la sola striscia magnetoresistiva 65, atta a formare, in

seguito a successive fasi di fabbricazione, il secondo elemento magnetoresistivo 34.

Quindi, figura 12c, si esegue una deposizione di uno strato dielettrico 70 sulla fetta 100. Lo strato dielettrico 70 viene quindi ridotto di spessore fino ad esporre la striscia magnetoresistiva 65. Gli strati dielettrici 62 e 70 vengono selettivamente attaccati in modo da formare aperture passanti (solo una apertura passante è visibile in figura 12c) in corrispondenza di regioni degli strati dielettrici 62 e 70 allineate, lungo l'asse Z, a rispettive regioni delle porzioni conduttive 31a e 31b.

Le aperture passanti vengono quindi riempite mediante materiale conduttivo, così da realizzare le vie passanti conduttive 41a e 41b descritte con riferimento alla figura 2.

Quindi, si deposita sulla fetta 100 uno strato di materiale conduttore, in particolare metallo. Questo strato di materiale conduttore viene selettivamente attaccato in modo da formare la porzione di collegamento elettrico 31c (mostrata, ad esempio, nelle figure 5 e 7), la porzione di collegamento elettrico 32c (mostrata, ad esempio, nelle figure 2 e 4), e le strutture Barber-Pole 73 del primo e del secondo elemento magnetoresistivo 33, 34. Il livello in cui sono formate le porzioni di collegamento elettrico 31c,

32c e la strutture Barber-Pole del primo e del secondo elemento magnetoresistivo 33, 34 è il terzo livello metallico ML3 della fetta 100.

In questo modo, la porzione conduttiva 31b è in collegamento elettrico con la porzione conduttiva 31a mediante le vie passanti conduttive 41a, 41b formate attraverso gli strati dielettrici 62 e 70.

In seguito, figura 12d, viene formato sulla fetta 100 uno strato dielettrico 75, e planarizzato. Lo strato dielettrico 75 viene attaccato selettivamente, in modo da formare in esso le vie passanti conduttive 39a, 39b (non visibili nella sezione di figura 12d). Al di sopra dello strato dielettrico 75 viene depositato uno strato metallico. Quest'ultimo viene attaccato in modo da definire le porzioni conduttive 32a, 32b (mostrate in vista superiore, ad esempio, nelle figure 2 e 3). Le porzioni conduttive 32a, 32b sono formate in modo tale che una regione di esse sia in contatto elettrico con una rispettiva via passante conduttiva 39a, 39b. In questo modo, la porzione conduttiva 32a è in collegamento elettrico con la porzione conduttiva 32b mediante le vie passanti conduttive 39a, 39b formate attraverso lo strato dielettrico 75.

Il livello in cui sono formate le porzioni conduttive 32a, 32b è il quarto livello metallico ML4 della fetta

100.

Una deposizione di un ulteriore strato dielettrico 77 al di sopra delle porzioni conduttive 32a, 32b consente di isolare queste ultime dall'esterno. Si ottiene in questo modo il sensore di campo magnetico 30 di figura 11.

Gli strati dielettrici 54, 59, 60, 62, 70, 75, 77 formano, al termine delle fasi di processo descritte, uno strato 78 dielettrico o isolante, ad esempio di ossido di silicio SiO_2 .

Le strisce magnetoresistive 55, 56 sono cresciute in modo noto, in modo tale che l'easy axis EA si estende lungo l'asse Y; le strisce magnetoresistive degli elementi magnetoresistivi 33, 34 (solo la striscia magnetoresistive 65 è mostrata in figura 10) sono anch'esse cresciute in modo noto, in modo tale che il loro rispettivo easy axis EA si estende lungo l'asse X.

La figura 13 mostra una ulteriore forma di realizzazione di un sensore di campo magnetico 110 secondo una ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione.

Secondo la forma di realizzazione di figura 13, il generatore di campo magnetico 110 è formato da una pluralità di strisce conduttive ("conductive strips"), ad esempio di metallo, complanari, formate nello stesso livello metallico. Le strisce conduttive si estendono lungo

direzioni X e Y ortogonali tra loro e si intersecano in punti di intersezione 113a-113d, formando una griglia 111.

Le operazioni di set/reset degli elementi magnetoresistivi del sensore di campo magnetico 110 sono eseguite polarizzando opportunamente la griglia 111.

Il sensore di campo magnetico 110 comprende, in particolare, quattro strisce conduttive 112a-112d, disposte a formare la griglia 111. Le strisce conduttive 112a, 112b si estendono lungo una direzione principale di estensione parallela all'asse X, mentre le strisce conduttive 112c, 112d si estendono lungo una direzione principale di estensione parallela all'asse Y.

Parzialmente sovrapposti alle strisce conduttive 112a-112d, sono disposti elementi magnetoresistivi 114a-114d. In particolare, gli elementi magnetoresistivi 114a e 114b sono disposti allineati, lungo l'asse Z, alle strisce conduttive 112a e 112b rispettivamente, e sono orientati in modo tale che il loro easy axis EA è ortogonale alla direzione principale di estensione della rispettiva striscia conduttiva 112a, 112b (cioè ortogonale all'asse X), e in modo tale che il loro hard axis HA è ortogonale alla direzione principale di estensione delle strisce conduttive 112c, 112d (cioè ortogonale all'asse Y).

Gli elementi magnetoresistivi 114c e 114d sono disposti allineati, lungo l'asse Z, alle strisce conduttive

112c e 112d rispettivamente, e sono orientati in modo tale che il loro easy axis EA è ortogonale alla direzione principale di estensione delle rispettive strisce conduttive 112c, 112d, e in modo tale che il loro hard axis HA è ortogonale alla direzione principale di estensione delle strisce conduttive 112a, 112b.

Con riferimento alla figura 14a, in uso, per le operazioni di set/reset degli elementi magnetoresistivi 114a, 114b, una corrente $\underline{i}_{SR}$ scorre nelle strisce conduttive 112a e 112b lungo la direzione definita dall'asse X (con versi opposti per le operazioni di set e reset), generando un campo magnetico B_{SR} avente componenti di campo lungo l'asse Y, cioè parallelo all'easy axis EA degli elementi magnetoresistivi 114a, 114b.

Con riferimento alla figura 14b, durante le operazioni di set/reset degli elementi magnetoresistivi 114c, 114d, una corrente $\underline{i}_{SR}$ scorre nelle strisce conduttive 112c e 112d lungo la direzione definita dall'asse Y (con versi opposti per le operazioni di set e reset), generando un campo magnetico B_{SR} avente componenti di campo lungo l'asse X, cioè parallelo all'easy axis EA degli elementi magnetoresistivi 114c, 114d.

Durante le operazioni di set/reset solo le strisce conduttive atte ad eseguire le rispettive operazioni sono polarizzate. Le restanti strisce conduttive sono mantenute

ad alta impedenza.

Secondo una ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione, è possibile eseguire contemporaneamente le operazioni di set/reset e calibrazione/compensazione offset degli elementi magnetoresistivi del sensore di campo magnetico 110 disponendo gli elementi magnetoresistivi 114a-114d in corrispondenza dei punti di intersezione 113a-113d. In particolare, l'elemento magnetoresistivo 114a è disposto in corrispondenza del punto di intersezione 113a; l'elemento magnetoresistivo 114b è disposto in corrispondenza del punto di intersezione 113b; l'elemento magnetoresistivo 114c è disposto in corrispondenza del punto di intersezione 113c; l'elemento magnetoresistivo 114d è disposto in corrispondenza del punto di intersezione 113d.

In questo modo, ciascun elemento magnetoresistivo 114a-114d è soggetto sia ad un campo magnetico parallelo al proprio easy axis (per le operazioni di set/reset), sia ad un campo magnetico parallelo al proprio hard axis (per le operazioni di compensazione/calibrazione).

Per le operazioni di calibrazione/compensazione offset degli elementi magnetoresistivi 114a, 114b, una corrente i_{OFF} scorre nelle strisce conduttive 112c, 112d lungo la direzione definita dall'asse Y, generando un rispettivo campo magnetico B_{OFF} avente componenti lungo l'asse X, cioè

parallelo all'hard axis HA degli elementi magnetoresistivi 114a, 114b. Per le operazioni di calibrazione/compensazione offset degli elementi magnetoresistivi 114c, 114d, una corrente i_{OFF} scorre nelle strisce conduttive 112a, 112b lungo la direzione definita dall'asse X, generando un rispettivo campo magnetico B_{OFF} avente componenti lungo l'asse Y, cioè parallelo all'hard axis HA degli elementi magnetoresistivi 114c, 114d.

La polarizzazione delle strisce conduttive per le operazioni di set e reset avviene con una corrente i_{SR} tipicamente compresa tra 200 mA e 1 A; le operazioni di calibrazione sono tipicamente effettuate generando una corrente i_{OFF} tipicamente compresa tra 5 mA e 50 mA. Tuttavia, sulla base della tipologia degli elementi magnetoresistivi utilizzati, tali valori possono essere differenti, maggiori o minori degli intervalli indicati.

Risulta evidente che le operazioni polarizzazione e lettura degli elementi magnetoresistivi 114a-114d sono eseguite in modo noto (ad esempio come schematizzato nelle figure 9 e 10, oppure inserendole in un ponte di Wheatstone), e qui non descritto in quanto non oggetto della presente invenzione.

Le figure 15a e 15b mostrano un sensore di campo magnetico 120 secondo una ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione. La figura 15b illustra una vista

in sezione della figura 15a, lungo la linea di sezione XV-XV di figura 15a.

Il sensore di campo magnetico 120 è analogo al sensore di campo magnetico 110 di figura 13 in quanto comprende quattro strisce conduttive 122a-122d, disposte a formare, in vista superiore, una griglia 121. Le strisce conduttive 122a, 122b si estendono lungo una direzione principale di estensione parallela all'asse Y, mentre le strisce conduttive 122c, 122d si estendono lungo una direzione principale di estensione parallela all'asse X. Parzialmente sovrapposti alle strisce conduttive 122a-122d, sono disposti elementi magnetoresistivi 124a-124d, analogamente a quanto descritto con riferimento alla figura 13.

Con riferimento alla figura 15b, il sensore di campo magnetico 120 comprende il substrato 51 ed uno strato dielettrico 123 estendentesi sulla superficie superiore 51a del substrato 51. Lo strato dielettrico 123 è analogo allo strato dielettrico 78 precedentemente descritto.

Gli elementi magnetoresistivi 124a, 124b sono tra loro complanari e si estendono nello strato isolante ad una prima distanza dalla superficie superiore 51a; analogamente, gli elementi magnetoresistivi 124c, 124d sono tra loro complanari e si estendono nello strato dielettrico 123 ad una seconda distanza dalla superficie superiore 51a. La prima e la seconda distanza sono diverse tra loro, ed in

particolare, la prima distanza è inferiore alla seconda distanza.

A differenza del sensore di campo magnetico 110, le strisce conduttive 122a-122d del sensore di campo magnetico 120 non sono tra loro elettricamente accoppiate. Più in particolare, le strisce conduttive 122a e 122b sono formate da: (i) porzioni di striscia conduttiva tra loro complanari ed estendentisi in uno stesso livello metallico; e (ii) porzioni di collegamento atte ad accoppiare elettricamente tra loro le porzioni di striscia conduttiva appartenenti ad una stessa striscia conduttiva 122a, 122b, ed estendentisi in un livello metallico diverso dal livello metallico in cui si estendono le porzioni di striscia conduttiva appartenenti ad una stessa striscia conduttiva 122a, 122b.

Analogamente, le strisce conduttive 122c e 122d sono formate da: (i) porzioni di striscia conduttiva tra loro complanari ed estendentisi in uno stesso livello metallico diverso dal livello metallico in cui si estendono le porzioni di striscia conduttiva appartenenti alle strisce conduttive 122a, 122b; e (ii) porzioni di collegamento atte ad accoppiare elettricamente tra loro le porzioni di striscia conduttiva appartenenti ad una stessa striscia conduttiva 122c, 122d, ed estendentisi in un livello metallico diverso dal livello metallico in cui si estendono le porzioni di striscia conduttiva appartenenti ad una

stessa striscia conduttiva 122c, 122d. A tal fine, le strisce conduttive 122a e 122b includono una rispettiva regione di "sottopasso" ("underpass") 125a, 125b in corrispondenza di punti di intersezione con le strisce conduttive 122c e 122d. Analogamente, le strisce conduttive 122c e 122d includono una rispettiva regione di "sottopasso" ("underpass") 125c, 125d in corrispondenza di ulteriori punti di intersezione con le strisce conduttive 122a e 122b. Ciascun underpass 125a-125d comprende una porzione conduttiva di sottopasso 126a-126d e due vie passanti 127', 127'', di materiale conduttivo, configurate per accoppiare elettricamente ciascuna porzione conduttiva di sottopasso 126a-126d con una rispettiva porzione di striscia conduttiva 122a-122d estendentesi nel livello metallico superiore, così da formare le strisce conduttive 122a-122d.

La forma di realizzazione delle figure 15a, 15b ha il vantaggio che le operazioni di set/reset degli elementi magnetoresistivi 124a-124d possono essere eseguite contemporaneamente per tutti gli elementi magnetoresistivi 124a-124d (si veda la figura 16).

Risulta evidente che, durante l'uso, gli elementi magnetoresistivi 124a-124d sono accoppiati ad un circuito di polarizzazione e lettura ad esempio come mostrato come mostrato esemplificativamente nelle figure 9 e 10.

Secondo una diversa forma di realizzazione possono essere previsti ulteriori quattro elementi magnetoresistivi, connessi tra loro e con gli elementi magnetoresistivi 124a-124d a formare, in modo di per sé noto, due rispettivi ponti di Wheatstone (uno per ciascun asse di rilevamento).

Con riferimento alla figura 16, in uso, per le operazioni di set/reset degli elementi magnetoresistivi 124a, 124b, una corrente i_{SR} scorre nelle strisce conduttive 122a e 122b lungo la direzione definita dall'asse X (con versi opposti per le operazioni di set e reset), generando un campo magnetico B_{SR} avente componenti di campo lungo l'asse Y, cioè parallelo all'easy axis EA degli elementi magnetoresistivi 124a, 124b.

Per eseguire le operazioni di set/reset degli elementi magnetoresistivi 124c, 124d, la stessa corrente i_{SR} scorre nelle strisce conduttive 122c e 122d lungo la direzione definita dall'asse Y (con versi opposti per le operazioni di set e reset), generando un campo magnetico B_{SR} avente componenti di campo lungo l'asse X, cioè parallelo all'easy axis EA degli elementi magnetoresistivi 124c, 124d.

Risulta evidente che, per garantire una stessa corrente i_{SR} in tutte le strisce conduttive 122a-122d ciascun underpass 125a-125d deve essere comparabile, per quando riguarda le caratteristiche conduttive, agli altri

underpass 125a-125d. Le attuali tecnologie di microfabbricazione, che garantiscono elevata ripetibilità di processi di fabbricazione, consentono di soddisfare questa richiesta. In particolare, gli underpass 125a-125d sono fabbricati in modo da avere basso valore di resistenza delle vie passanti e bassa "sheet resistance".

Le figure 17a e 17b mostrano, rispettivamente in vista superiore e in vista in sezione (lungo la linea di sezione XVII-XVII di figura 17a), un sensore di campo magnetico 120' secondo una ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione. Il sensore di campo magnetico 120' è analogo al sensore di campo magnetico 120 di figura 15a, ma comprende le sole strisce conduttive 122a e 122c. In questo caso, solo la striscia conduttiva 122a è provvista dell'underpass 125a. Gli elementi magnetoresistivi 124a e 124c possono essere disposti sovrapposti alla rispettiva striscia conduttiva 122a, 122c come mostrato in figura 15a, oppure verticalmente allineati (lungo Z) tra loro e ad entrambe le strisce conduttive 122a, 122c, come mostrato in figura 17b. In altre parole, gli elementi magnetoresistivi 124c e 124a si estendono sostanzialmente allineati, lungo Z, all'underpass 125a, ad una rispettiva prima e seconda distanza dalla superficie superiore 51a del substrato 51. La prima e la seconda distanza sono diverse tra loro, ed in particolare, la prima distanza è inferiore alla seconda

distanza. Risulta evidente che, durante l'uso, gli elementi magnetoresistivi 124a e 124c sono accoppiati ad un circuito di polarizzazione e lettura ad esempio come mostrato come mostrato esemplificativamente nelle figure 9 e 10.

Secondo una ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione, mostrata nelle figure 18a (vista superiore) e 18b (vista in sezione lungo la linea di sezione XVIII-XVIII di figura 18a), un sensore di campo magnetico 150 comprende un concentratore 151. Il concentratore 151 è ad esempio del tipo descritto in T02010A001050. Il sensore di campo magnetico 150 è un sensore del tipo descritto secondo una qualsiasi delle forme di realizzazione della presente invenzione, ad esempio il sensore 120 delle figure 15a, 15b.

Per consentire una lettura (rilevazione) indipendente di campi magnetici agenti lungo l'asse Z, il sensore di campo magnetico 150 comprende ulteriori elementi magnetoresistivi 152-155, disposti lateralmente e simmetrici rispetto al concentratore 151, e configurati in modo tale da avere un asse di rilevazione sul piano XY, in particolare lungo l'asse X. Sebbene un solo elemento magnetoresistivo 152 o 154 sia sufficiente per consentire di operare il sensore di campo magnetico 150 come rilevatore di campi magnetici lungo Z, l'utilizzo di due o più elementi magnetoresistivi 152, 154 offre il vantaggio

di cancellare l'effetto di un eventuale campo interferente sugli elementi magnetoresistivi 152, 154 parallelamente al piano XY (e in particolare lungo X nell'esempio in Figura 18a). La figura 18a mostra quattro elementi magnetoresistivi 152-155 per la rilevazione lungo Z, due dei quali sono disposti simmetrici (lungo X) rispetto all'elemento magnetoresistivo 124a, e gli altri due sono disposti simmetrici (lungo X) rispetto all'elemento magnetoresistivo 124b. Tuttavia, altre disposizioni sono possibili, ad esempio in cui gli elementi magnetoresistivi sono tra loro sfalsati lungo X.

I magnetoresistori 152-155 sono realizzati, secondo una forma di realizzazione della presente invenzione, complanari con i magnetoresistori 124a, 124b (cioè i magnetoresistori 124a, 124b si estendono ad una distanza dalla superficie superiore 51a del substrato 51 pari alla distanza, sempre misurata a partire dalla superficie superiore 51a, a cui si estendono i magnetoresistori 152-155). Secondo una ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione, i magnetoresistori 152-155 sono realizzati complanari con i magnetoresistori 124c, 124d (cioè i magnetoresistori 124c, 124d si estendono ad una distanza dalla superficie superiore 51a del substrato 51 pari alla distanza, sempre misurata a partire dalla superficie superiore 51a, a cui si estendono i

magnetoresistori 152-155). Secondo una ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione, i magnetoresistori 152-155 sono realizzati su un piano diverso dal piano su cui sono realizzati i magnetoresistori 124a-124d (cioè i magnetoresistori 124a-124d si estendono a rispettive distanze dalla superficie superiore 51a del substrato 51 diverse dalla distanza, sempre misurata a partire dalla superficie superiore 51a, a cui si estendono i magnetoresistori 152-155).

In dettaglio, con riferimento esemplificativo al sensore di campo magnetico 150, una trincea o cavità 153 si estende all'interno del substrato 51, dalla superficie superiore 51a fino in prossimità della superficie inferiore 51b, o viceversa.

La trincea 153 è, secondo una forma di realizzazione, disposta lateralmente sfalsata rispetto agli elementi magnetoresistivi 124a, 124b, ma può anche essere sovrapposta (lungo Z) agli elementi magnetoresistivi 124a, 124b. La trincea 153 alloggia il concentratore 151 formato da uno strato di materiale ferromagnetico che copre i lati e il fondo della trincea 153. Il concentratore 151 è di un materiale ferromagnetico "morbido" (cioè, può essere magnetizzato facilmente e non mantiene la magnetizzazione dopo che è stato rimosso il campo magnetico esterno). Ad esempio, può essere utilizzata una lega amorfa a base di

cobalto oppure una lega permalloy, tipicamente non anisotropa, in particolare con "easy axis" non allineato alla parete verticale (asse Z).

Nella sezione trasversale di figura 18b, il concentratore 151 ha forma sostanzialmente ad U comprendente due bracci 151a, 151b ed una base 151c. I bracci 151a, 151b coprono e si estendono contigui alle pareti laterali della trincea 153, per la profondità della trincea 153 stessa; la base 151c copre ed è contigua al fondo della trincea 153. I bracci 151a, 151b hanno una dimensione principale lungo l'asse Z molto maggiore rispetto al loro spessore.

Di conseguenza, quando il sensore 150 è sottoposto ad un campo magnetico esterno B_{ext} parallelo all'asse Z, i bracci 151a, 151b del concentratore 151 provocano una deflessione delle linee del campo B_{ext} e la generazione di una componente orizzontale di campo B_{ext_x} parallela all'asse X e quindi parallela al piano di sensibilità degli elementi magnetoresistivi 152, 154. La componente orizzontale B_{ext_x} può quindi essere rilevata dagli elementi magnetoresistivi mediante un circuito di lettura esterno in modo noto.

Dato che il concentratore 151 è di materiale ferromagnetico, si crea un circuito magnetico che favorisce l'effetto di concentrazione del campo magnetico e quindi

conferisce al sensore 150 elevata sensibilità.

Secondo una ulteriore forma di realizzazione della presente invenzione, per migliorare ulteriormente l'insensibilità a campi magnetici diretti parallelamente al piano XY è possibile collegare elementi magnetoresistivi aventi il proprio asse di rilevamento orientato lungo una stessa direzione a formare un ponte di Wheatstone. In dettaglio, un sensore può comprendere un solo ponte di Wheatstone, due ponti di Wheatstone o tre ponti di Wheatstone, a seconda del numero di assi di rilevazione richiesti.

Le figure 19 e 20 mostrano (rispettivamente in vista superiore e in vista in sezione lungo la linea di sezione XIX-XIX), e a titolo esemplificativo, un sensore di campo magnetico 170 provvisto di un solo ponte di Wheatstone, e presentante un concentratore 172 analogo al concentratore 150 mostrato e descritto con riferimento alle figure 18a, 18b. Il sensore di campo magnetico 170 è atto a rilevare un campo magnetico esterno B_{ext} agente lungo Z.

Il sensore 170 presenta quattro elementi magnetoresistivi 171a-171d, collegati a formare un ponte di Wheatstone 175, collegato, mediante piste conduttive 176, a terminali di polarizzazione Vb e GND, e atto a fornire un segnale di uscita Vo. Ciascun elemento magnetoresistivo 171a-171d realizza un resistore R1-R4. I resistori R1-R4

sono fra loro uguali per quanto riguarda le caratteristiche geometriche ed elettriche degli elementi magnetoresistivi.

Con la configurazione delle figure 19, 20, i bracci 172a, 172b del concentratore 172 focalizzano il flusso magnetico esterno B_{ext} in modo da deflettere le linee di flusso magnetico e creare componenti di campo parallele all'asse X ma di direzione opposta, dato che esse sono guidate attraverso il materiale ferromagnetico degli elementi magnetoresistivi, seguendo il percorso a minima riluttanza. Di conseguenza, con campo magnetico esterno B_{ext} diretto lungo Z e magnetizzazione iniziale in direzione Y, i resistori R3, R4 vedono una componente di campo lungo X avente un primo segno (es., positiva) e i resistori R1, R2 vedono una componente di campo lungo X avente un secondo segno opposto al primo segno (es., negativa). Dunque, la resistenza dei resistori R1, R3 diminuisce di ΔR , mentre la resistenza dei resistori R2, R4 aumenta di ΔR . Ne consegue che la tensione di uscita dal ponte di Wheatstone 175 è proporzionale alla variazione di resistenza e quindi al campo magnetico esterno. Di conseguenza un apposito circuito di lettura, in base al segnale rilevato e alla configurazione geometrica, è in grado di determinare l'ampiezza del campo magnetico esterno.

Quanto descritto si applica in modo analogo ad un sensore provvisto di un secondo ed eventualmente un terzo

ponte di Wheatstone, i cui elementi magnetoresistivi sono orientati in modo da essere sensibili a campi esterni agenti lungo X e lungo Y.

Indipendente dalla forma di realizzazione del sensore di campo magnetico, quest'ultimo può essere formato in forma integrata in un chip ASIC o su una piastrina separata dal chip ASIC e collegata con il chip ASIC mediante connessioni a bump (o tramite wire bonding). Il chip ASIC comprende, in modo noto, una pluralità di componenti elettronici attivi e/o passivi integrati nel substrato. In particolare, i componenti elettronici formano un circuito per l'alimentazione e/o la lettura in un sensore di campo magnetico. Il circuito ASIC è configurato per alimentare gli elementi magnetoresistivi con un segnale di ingresso V_{AL} atto a polarizzare gli elementi magnetoresistivi del sensore di campo magnetico. Il circuito ASIC è inoltre configurato per leggere un segnale di uscita V_{OUT} generato dagli elementi magnetoresistivi in risposta al segnale di ingresso V_{AL} e ad un (eventuale) campo magnetico esterno da rilevare.

Il circuito di ASIC di alimentazione e lettura è di tipo noto e comprende, ad esempio, front end differenziali o fully differential resistivi o switch capacitor, o comunque qualsiasi circuito noto in letteratura atto allo scopo.

Come detto, secondo una forma di realizzazione, il sensore di campo magnetico (comprendente gli elementi magnetoresistivi e il generatore di campo magnetico) è integrato in un substrato diverso dal substrato del chip ASIC, ed è collegabile al circuito ASIC mediante bumps. A tal fine, il substrato del circuito ASIC e della piastrina che porta il sensore di campo magnetico presentano sulla superficie una rispettiva pluralità di terminali o "pads" configurati per agire come interfaccia tra il circuito ASIC e gli elementi magnetoresistivi e la bobina.

Secondo un'ulteriore forma di realizzazione, il generatore di campo magnetico e gli elementi magnetoresistivi sono formati in forma integrata in rispettivi livelli metallici superiori del chip ASIC. Ad esempio, gli elementi magnetoresistivi sono formati nell'ultimo livello metallico del chip ASIC e il generatore di campo magnetico è formata nel livello metallico immediatamente sottostante. Secondo questa forma di realizzazione non sono necessari bumps o altri elementi di connessione tra piastrine, con il vantaggio di ridurre le capacità parassite.

Il sensore di campo magnetico secondo una qualsiasi delle forme di realizzazione descritte può essere utilizzato in una bussola ("compass"), in sensori di posizione lineari, in sensori di posizione angolari, ecc.

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

In particolare la dimensione complessiva del sensore può essere notevolmente ridotta, così da ottenere un sensore avente dimensioni di area superficiale inferiori a $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$.

Inoltre, elementi magnetoresistivi tra loro non complanari sono formati in diverse fasi di processo di fabbricazione. In questo modo, ciascuno di essi può essere formato depositando materiale ferromagnetico in modo tale da ottenere un elemento magnetoresistivo il cui easy axis è orientato come desiderato (in particolare ortogonale alle linee di campo magnetico utilizzato per il set/reset). In conseguenza di ciò si ottiene un sensore la cui sensitività è migliorata (maggiore stabilità) e in cui la procedura di set/reset è più efficiente.

Risulta infine chiaro che a quanto 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.

RIVENDICAZIONI

1. Sensore di campo magnetico (30; 110; 120; 120'; 150; 170), comprendente:

- una piastrina (100) includente un substrato (51) avente una prima ed una seconda superficie (51a, 51b) ed uno strato isolante (78) coprente la prima superficie (51a);

- un primo magnetoresistore (33; 114c; 124c) estendentesi nello strato isolante e avente un asse principale di magnetizzazione (EA) e un asse secondario di magnetizzazione (HA);

- un secondo magnetoresistore (35; 114a; 124a) estendentesi nello strato isolante e avente un asse principale di magnetizzazione (EA) e un asse secondario di magnetizzazione (HA), l'asse principale di magnetizzazione (EA) del secondo magnetoresistore (35; 114a; 124a) estendendosi trasversalmente all'asse principale di magnetizzazione (EA) del primo magnetoresistore (33; 114c; 124c), e l'asse secondario di magnetizzazione (HA) del secondo magnetoresistore (35; 114a; 124a) estendendosi trasversalmente all'asse secondario di magnetizzazione (HA) del primo magnetoresistore (33; 114c; 124c);

- un primo generatore di campo magnetico (32; 112c; 122c) configurato per generare un primo campo magnetico avente linee di campo lungo l'asse principale di

Simone BERTOLOTTO
(Iscrizione Albo nr. 1422/B)

magnetizzazione del primo magnetoresistore (33; 114c; 124c);

- un secondo generatore di campo magnetico (31; 112a; 122a) configurato per generare un secondo campo magnetico avente linee di campo lungo l'asse principale di magnetizzazione del secondo magnetoresistore (35; 114a; 124a),

caratterizzato dal fatto che il primo ed il secondo magnetoresistore (33, 35; 114c, 114a; 124c, 124a) si estendono nello strato isolante ad una rispettiva prima e seconda distanza, diverse tra loro, dalla prima superficie (51a).

2. Sensore secondo la rivendicazione 1, in cui il primo (112c) e il secondo (112a) generatore di campo magnetico includono rispettive prime e seconde strisce conduttive ("conductive strips") complanari tra loro, le prime e le seconde strisce conduttive essendo tra loro elettricamente accoppiate in una prima regione di intersezione (113a-113d).

3. Sensore secondo la rivendicazione 1, in cui il primo e il secondo generatore di campo magnetico (31, 32; 122c, 122a) includono rispettive prime (31a; 122c; 126c) e seconde (32a; 126a; 122a) strisce conduttive ("conductive strips") che si estendono nello strato isolante ad una rispettiva terza e quarta distanza, diverse tra loro, dalla

prima superficie (51a).

4. Sensore secondo la rivendicazione 3, in cui la prima striscia conduttiva (32a; 122c) del primo generatore di campo magnetico e la seconda striscia conduttiva (31a; 126a) del secondo generatore di campo magnetico si estendono nello strato isolante su rispettivi piani di giacenza, almeno parzialmente allineati tra loro lungo una prima direzione (Z) ortogonale a detti rispettivi piani di giacenza.

5. Sensore secondo la rivendicazione 4, in cui il primo magnetoresistore (33) e il secondo magnetoresistore (35) si estendono nello strato isolante su rispettivi piani di giacenza, almeno parzialmente allineati tra loro lungo la prima direzione (Z).

6. Sensore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui la prima striscia conduttiva (32a; 122c) si estende tra terminali di conduzione polarizzabili in modo da generare in detta prima striscia conduttiva una corrente elettrica (i_p' , i_{SR} , i_{OFF}) lungo una prima direzione di conduzione (Y), e in cui la seconda striscia conduttiva (31a; 126a) si estende tra terminali di conduzione polarizzabili in modo da generare in detta seconda striscia conduttiva una corrente elettrica (i_p'' , i_{SR} , i_{OFF}) lungo una seconda direzione di conduzione (X), l'asse principale di magnetizzazione del primo magnetoresistore (33; 124c)

essendo ortogonale alla prima direzione di conduzione (Y), e l'asse principale di magnetizzazione del secondo magnetoresistore (35; 124a) essendo ortogonale alla seconda direzione di conduzione (X).

7. Sensore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui il primo generatore di campo magnetico (32; 122c) include:

- una pluralità di prime strisce conduttive (32a, 32b; 122c) complanari tra loro; e
- una prima porzione di collegamento elettrico (32c; 126c),

le prime strisce conduttive di detta pluralità di prime strisce conduttive (32a, 32b; 122c) essendo elettricamente accoppiate ad una rispettiva regione di detta prima porzione di collegamento elettrico (32c; 126c) mediante fori passanti conduttivi estendentisi nello strato isolante.

8. Sensore secondo la rivendicazione 7, in cui il secondo generatore di campo magnetico (31; 122a) include:

- una pluralità di seconde strisce conduttive (31a, 31b; 122a) complanari tra loro; e
- una seconda porzione di collegamento elettrico (31c; 126a),

le seconde strisce conduttive di detta pluralità di seconde strisce conduttive (31a, 31b; 122a) essendo

eletttricamente accoppiate ad una rispettiva regione di detta seconda porzione di collegamento elettrico (31c; 126a) mediante fori passanti conduttivi estendentisi nello strato isolante,

la prima e la seconda porzione di collegamento elettrico essendo complanari tra loro ed estendendosi ad una quinta distanza dalla prima superficie (51a).

9. Sensore secondo la rivendicazione 8, in cui detta quinta distanza è diversa da dette terza e quarta distanza.

10. Sensore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 7-9, in cui il primo magnetoresistore include una striscia ("strip") ferromagnetica provvista di una struttura Barber-Pole, la struttura Barber-Pole includendo una pluralità di elementi metallici estendentisi trasversalmente a, ed in contatto elettrico con, la striscia ferromagnetica, ed essendo complanare a detta prima porzione di collegamento elettrico (32c; 126c).

11. Sensore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre:

- una prima pluralità di magnetoresistori aventi un asse principale di magnetizzazione (EA) parallelo all'asse principale di magnetizzazione (EA) del primo magnetoresistore, e un asse secondario di magnetizzazione (HA) parallelo all'asse secondario di magnetizzazione (HA) del primo magnetoresistore; e

- una seconda pluralità di magnetoresistori aventi un asse principale di magnetizzazione (EA) parallelo all'asse principale di magnetizzazione (EA) del secondo magnetoresistore, e un asse secondario di magnetizzazione (HA) parallelo all'asse secondario di magnetizzazione (HA) del secondo magnetoresistore,

in cui detti magnetoresistori appartenenti alla prima pluralità di magnetoresistori sono connessi a formare primo ponte di Wheatstone, e

detti magnetoresistori appartenenti alla seconda pluralità di magnetoresistori sono connessi a formare secondo ponte di Wheatstone.

12. Sensore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre un terzo magnetoresistore (152-155) estendentesi nello strato isolante e avente un asse principale di magnetizzazione (EA) e un asse secondario di magnetizzazione (HA), e in cui la piastrina (100) alloggia un concentratore (151) di materiale ferromagnetico includente almeno un braccio (151a; 151b) estendentesi in direzione trasversale all'asse principale di magnetizzazione (EA) del terzo magnetoresistore in modo da deflettere linee di flusso magnetiche dirette ortogonalmente ad un piano individuato dall'asse principale di magnetizzazione (EA) e dall'asse secondario di magnetizzazione (HA) del terzo magnetoresistore, e generare

componenti di campo magnetico dirette parallelamente all'asse secondario di magnetizzazione (HA) del terzo magnetoresistore.

13. Sensore secondo la rivendicazione 12, in cui il terzo magnetoresistore (152-155) si estende nello strato isolante ad una distanza dalla prima superficie (51a) diversa da dette prima e seconda distanza.

14. Sensore secondo la rivendicazione 12, in cui il terzo magnetoresistore (152-155) si estende nello strato isolante ad una distanza dalla prima superficie (51a) pari a detta prima o detta seconda distanza.

15. Metodo di fabbricazione di un sensore di campo magnetico (30; 110; 120; 120'; 150; 170), comprendente le fasi di:

- disporre una piastrina (100) includente un substrato (51) avente una prima ed una seconda superficie (51a, 51b)
- formare uno strato isolante coprente la prima superficie (51a);
- formare, al di sopra della prima superficie del substrato, un primo magnetoresistore (33; 124c) avente un asse principale di magnetizzazione (EA) e un asse secondario di magnetizzazione (HA);
- formare, al di sopra della prima superficie del substrato, un secondo magnetoresistore (35; 124a) avente un asse principale di magnetizzazione (EA) e un asse

secondario di magnetizzazione (HA), l'asse principale di magnetizzazione (EA) del secondo magnetoresistore (35; 124a) estendendosi trasversalmente all'asse principale di magnetizzazione (EA) del primo magnetoresistore (33; 124c), e l'asse secondario di magnetizzazione (HA) del secondo magnetoresistore (35; 124a) estendendosi trasversalmente all'asse secondario di magnetizzazione (HA) del primo magnetoresistore (33; 124c);

- formare, al di sopra della prima superficie del substrato, un primo generatore di campo magnetico (32; 122c) configurato per generare un primo campo magnetico avente linee di campo lungo l'asse principale di magnetizzazione del primo magnetoresistore (33; 124c),

- formare, al di sopra della prima superficie del substrato, un secondo generatore di campo magnetico (31; 122a) configurato per generare un secondo campo magnetico avente linee di campo lungo l'asse principale di magnetizzazione del secondo magnetoresistore (35; 124a),

caratterizzato dal fatto che le fasi di formare il primo ed il secondo magnetoresistore comprendono, rispettivamente:

- formare il primo magnetoresistore nello strato isolante ad una prima distanza dalla prima superficie (51a); e

- formare il secondo magnetoresistore nello strato

isolante ad una seconda distanza, diversa dalla prima distanza, dalla prima superficie (51a).

16. metodo secondo la rivendicazione 15, in cui le fasi di formare il primo e il secondo generatore di campo magnetico includono formare rispettive prime e seconde strisce conduttive ("conductive strips") complanari tra loro, in modo tale che le prime e le seconde strisce conduttive siano tra loro elettricamente accoppiate in una prima zona di intersezione.

17. metodo secondo la rivendicazione 15, in cui le fasi di formare il primo e il secondo generatore di campo magnetico (31, 32; 122c, 122a) includono:

- formare prime strisce conduttive ("conductive strips") (31a; 122c; 126c) nello strato isolante ad una terza distanza dalla prima superficie (51a); e

- formare seconde strisce conduttive (32a; 126a; 122a) nello strato isolante ad una quarta distanza, diversa dalla terza distanza, dalla prima superficie (51a).

18. Metodo secondo la rivendicazione 15, in cui formare la prima striscia conduttiva (32a; 122c) del primo generatore di campo magnetico e la seconda striscia conduttiva (31a; 126a) del secondo generatore di campo magnetico comprende formare la prima e la seconda striscia conduttiva nello strato isolante su rispettivi piani di giacenza, almeno parzialmente allineati tra loro lungo una

prima direzione (Z) ortogonale a detti rispettivi piani di giacenza.

19. Sensore secondo la rivendicazione 18, in cui le fasi di formare il primo magnetoresistore (33) e il secondo magnetoresistore (35) comprendono formare il primo e il secondo magnetoresistore nello strato isolante su rispettivi piani di giacenza, almeno parzialmente allineati tra loro lungo la prima direzione (Z).

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

Simone BERTOLOTTO

CLAIMS

1. A magnetic-field sensor (30; 110; 120; 120'; 150; 170), comprising:

- 5 - a chip (100) including a substrate (51) having a first surface (51a) and a second surface (51b) and an insulating layer (78) covering the first surface (51a);
- a first magnetoresistor (33; 114c; 124c), extending in the insulating layer and having a main axis of magnetization (EA) and a secondary axis of magnetization (HA);
- 10 - a second magnetoresistor (35; 114a; 124a), extending in the insulating layer and having a main axis of magnetization (EA) and a secondary axis of magnetization (HA), the main axis of magnetization (EA) of the second magnetoresistor (35; 114a; 124a) extending in a direction transverse to the main axis of magnetization (EA) of the first magnetoresistor (33; 114c; 124c) and the secondary axis of magnetization (HA) of the second magnetoresistor (35; 114a; 124a) extending in a direction transverse to the secondary axis of magnetization (HA) of the first magnetoresistor (33; 114c; 124c);
- 15 - a first magnetic-field generator (32; 112c; 122c) configured for generating a first magnetic field having field lines along the main axis of magnetization of the first magnetoresistor (33; 114c; 124c); and
- 20 - a second magnetic-field generator (31; 112a; 122a) configured for generating a second magnetic field having field lines along the main axis of magnetization of the second magnetoresistor (35; 114a; 124a),
- said sensor being characterized in that the first and second magnetoresistors (33, 35; 114c, 114a; 124c, 124a) extend in the insulating layer at a respective first and second distance, different from one another, from the first surface (51a).
- 30

35 2. The sensor according to claim 1, wherein the first

magnetic-field generator (112c) and the second magnetic-field generator (112a) include respective first and second conductive strips that are mutually coplanar, the first and second conductive strips being electrically coupled to one another in a first intersection region (113a-113d).

3. The sensor according to claim 1, wherein the first and second magnetic-field generators (31, 32; 122c, 122a) include respective first conductive strips (31a; 122c; 126c) and second conductive strips (32a; 126a; 122a) that extend in the insulating layer at a respective third and fourth distance, which are different from one another, from the first surface (51a).

4. The sensor according to claim 3, wherein the first conductive strip (32a; 122c) of the first magnetic-field generator and the second conductive strip (31a; 126a) of the second magnetic-field generator extend in the insulating layer on respective planes of lie, at least partially aligned to one another along a first direction (Z) orthogonal to said respective planes of lie.

5. The sensor according to claim 4, wherein the first magnetoresistor (33) and the second magnetoresistor (35) extend into the insulating layer on respective planes of lie, at least partially aligned to one another along the first direction (Z).

6. The sensor according to any one of the preceding claims, wherein the first conductive strip (32a; 122c) extends between biasable conduction terminals so as to generate in said first conductive strip an electric current (i_p' , i_{SR} , i_{OFF}) in a first conduction direction (Y) and wherein the second conductive strip (31a; 126a) extends between biasable conduction terminals so as to generate in said second conductive strip an

electric current (i_p , i_{SR} , i_{OFF}) in a second conduction direction (X), the main axis of magnetization of the first magnetoresistor (33; 124c) being orthogonal to the first conduction direction (Y) and the main axis of magnetization of the second magnetoresistor (35; 124a) being orthogonal to the second conduction direction (X).

7. The sensor according to any one of the preceding claims, wherein the first magnetic-field generator (32; 122c) includes:

- a plurality of first conductive strips (32a, 32b; 122c) that are mutually coplanar; and
- a first electrical-connection portion (32c; 126c), the first conductive strips of said plurality of first conductive strips (32a, 32b; 122c) being electrically coupled to a respective region of said first electrical-connection portion (32c; 126c) by means of conductive through holes extending in the insulating layer.

8. The sensor according to claim 7, wherein the second magnetic-field generator (31; 122a) includes:

- a plurality of second conductive strips (31a, 31b; 122a) that are mutually coplanar; and
- a second electrical-connection portion (31c; 126a), the second conductive strips of said plurality of second conductive strips (31a, 31b; 122a) being electrically coupled to a respective region of said second electrical-connection portion (31c; 126a) by means of conductive through holes extending in the insulating layer, the first and second electrical-connection portions being mutually coplanar and extending at a fifth distance from the first surface (51a).

9. The sensor according to claim 8, wherein said fifth distance is different from said third and fourth distances.

10. The sensor according to any one of claims 7-9, wherein the first magnetoresistor includes a ferromagnetic strip provided with a barber-pole structure, the barber-pole structure including a plurality of metal elements extending in a direction transverse to and in electrical contact with, the ferromagnetic strip and being coplanar to said first electrical-connection portion (32c; 126c).

11. The sensor according to any one of the preceding claims, further comprising:

- a first plurality of magnetoresistors having a main axis of magnetization (EA) parallel to the main axis of magnetization (EA) of the first magnetoresistor and a secondary axis of magnetization (HA) parallel to the secondary axis of magnetization (HA) of the first magnetoresistor; and
- a second plurality of magnetoresistors having a main axis of magnetization (EA) parallel to the main axis of magnetization (EA) of the second magnetoresistor and a secondary axis of magnetization (HA) parallel to the secondary axis of magnetization (HA) of the second magnetoresistor, wherein said magnetoresistors belonging to the first plurality of magnetoresistors are connected to form a first Wheatstone bridge and said magnetoresistors belonging to the second plurality of magnetoresistors are connected to form a second Wheatstone bridge.

12. The sensor according to any one of the preceding claims, further comprising a third magnetoresistor (152-155), which extends into the insulating layer and has a main axis of magnetization (EA) and a secondary axis of magnetization (HA) and wherein the chip (100) houses a concentrator (151) made of ferromagnetic material including at least one arm (151a; 151b), which extends in a direction transverse to the main axis of magnetization (EA) of the third magnetoresistor so as to deflect magnetic lines of flux oriented orthogonal to a

plane identified by the main axis of magnetization (EA) and by the secondary axis of magnetization (HA) of the third magnetoresistor and generate components of magnetic field oriented parallel to the secondary axis of magnetization (HA) of the third magnetoresistor.

13. The sensor according to claim 12, wherein the third magnetoresistor (152-155) extends into the insulating layer at a distance from the first surface (51a) different from said first distance and said second distance.

14. The sensor according to claim 12, wherein the third magnetoresistor (152-155) extends into the insulating layer at a distance from the first surface (51a) equal to said first distance or said second distance.

15. A method of manufacturing a magnetic-field sensor (30; 110; 120; 120'; 150; 170), comprising the steps of:

- providing a chip (100) including a substrate (51) having a first surface (51a) and a second surface (51b);
- forming an insulating layer covering the first surface (51a);
- forming, above the first surface of the substrate, a first magnetoresistor (33; 124c) having a main axis of magnetization (EA) and a secondary axis of magnetization (HA);
- forming, above the first surface of the substrate, a second magnetoresistor (35; 124a) having a main axis of magnetization (EA) and a secondary axis of magnetization (HA), the main axis of magnetization (EA) of the second magnetoresistor (35; 124a) extending in a direction transverse to the main axis of magnetization (EA) of the first magnetoresistor (33; 124c) and the secondary axis of magnetization (HA) of the second magnetoresistor (35; 124a) extending in a direction transverse to the secondary axis of magnetization (HA) of the first magnetoresistor (33; 124c);

- forming, above the first surface of the substrate, a first magnetic-field generator (32; 122c) configured for generating a first magnetic field having field lines along the main axis of magnetization of the first magnetoresistor (33; 124c); and
5 - forming, above the first surface of the substrate, a second magnetic-field generator (31; 122a) configured for generating a second magnetic field having field lines along the main axis of magnetization of the second magnetoresistor (35; 124a), said method being characterized in that the steps of forming
10 the first and second magnetoresistors comprise, respectively:
- forming the first magnetoresistor in the insulating layer at a first distance from the first surface (51a); and
- forming the second magnetoresistor in the insulating layer at a second distance, different from the first distance, from
15 the first surface (51a).

16. The method according to claim 15, wherein the steps of forming the first and second magnetic-field generators include forming respective first and second conductive strips that are
20 mutually coplanar, and in such a way that the first and second conductive strips are electrically coupled to one another at a first area of intersection.

17. The method according to claim 15, wherein the steps of forming the first and second magnetic-field generators (31, 32; 122c, 122a) include:
25 - forming first conductive strips (31a; 122c; 126c) in the insulating layer at a third distance from the first surface (51a); and
30 - forming second conductive strips (32a; 126a; 122a) in the insulating layer at a fourth distance, different from the third distance, from the first surface (51a).

18. The method according to claim 15, wherein forming the
35 first conductive strip (32a; 122c) of the first magnetic-field

generator and the second conductive strip (31a; 126a) of the second magnetic-field generator comprises forming the first and second conductive strips in the insulating layer on respective planes of lie, at least partially aligned to one another along a first direction (Z) orthogonal to said respective planes of lie.

19. The sensor according to claim 18, wherein the steps of forming the first magnetoresistor (33) and the second magnetoresistor (35) comprise forming the first and second magnetoresistors in the insulating layer on respective planes of lie, at least partially aligned to one another along the first direction (Z).

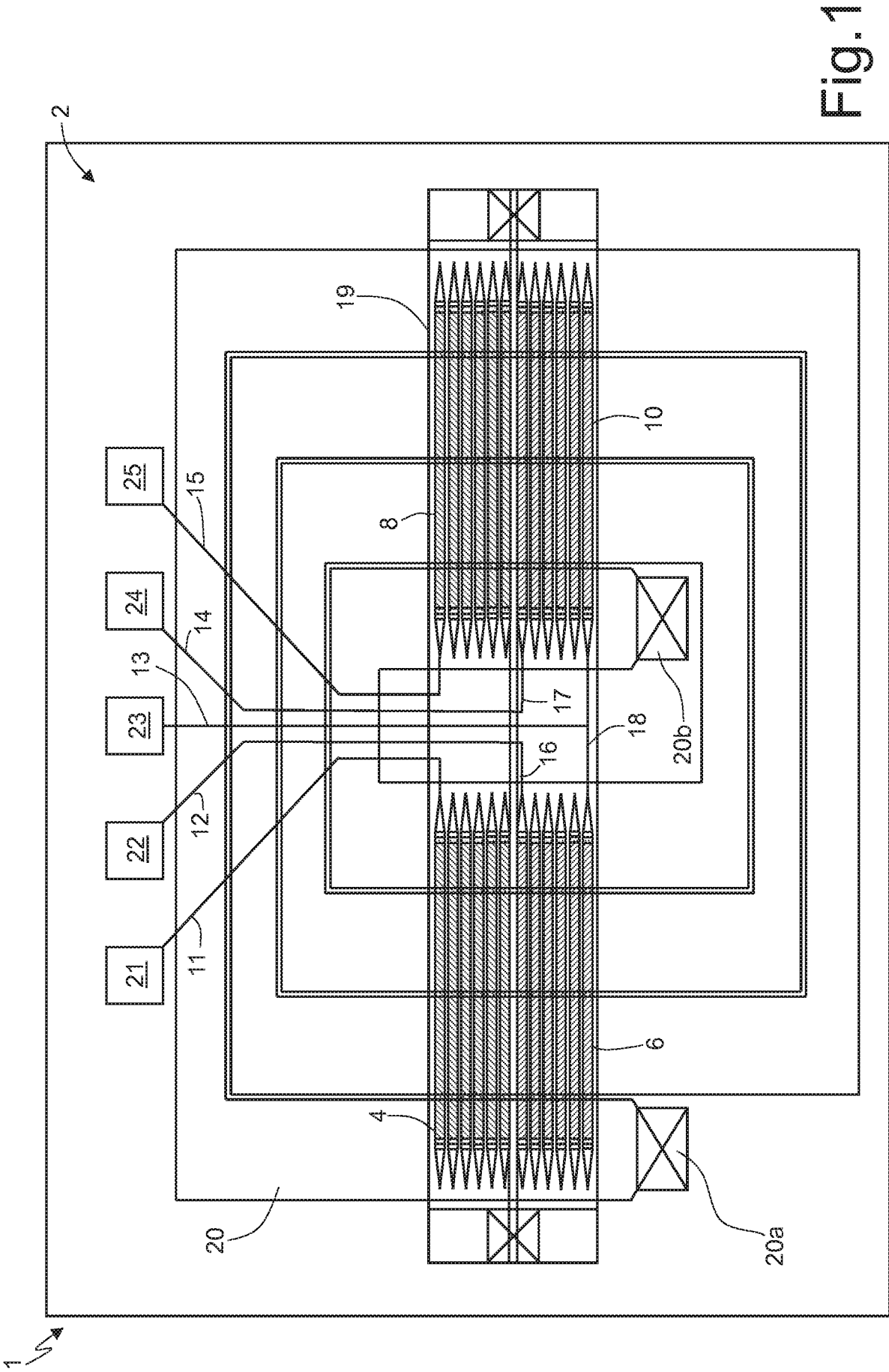


Fig. 1

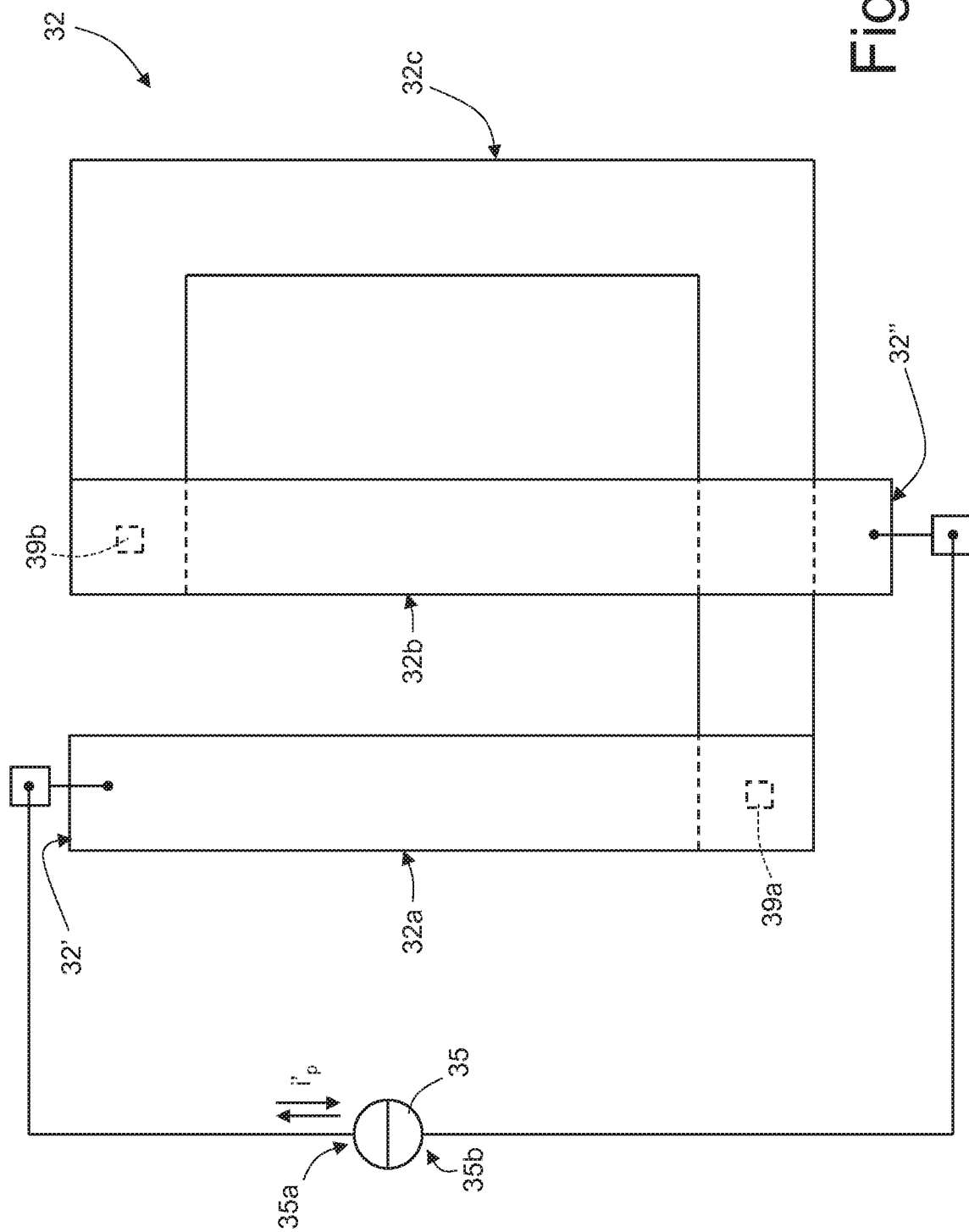


Fig.3



Fig. 4

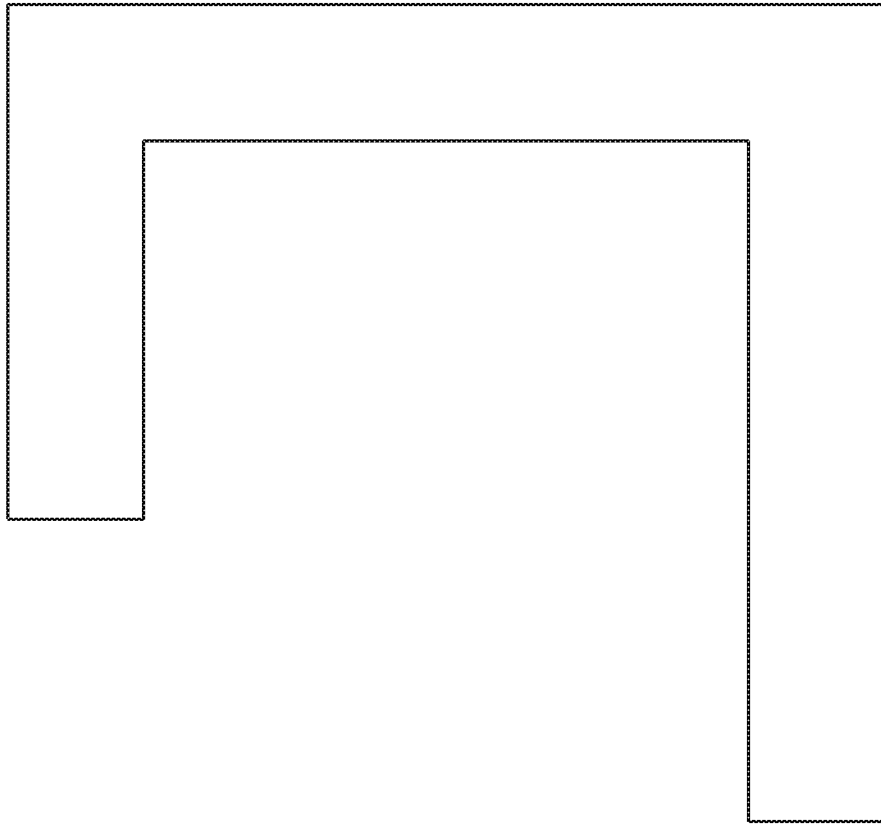
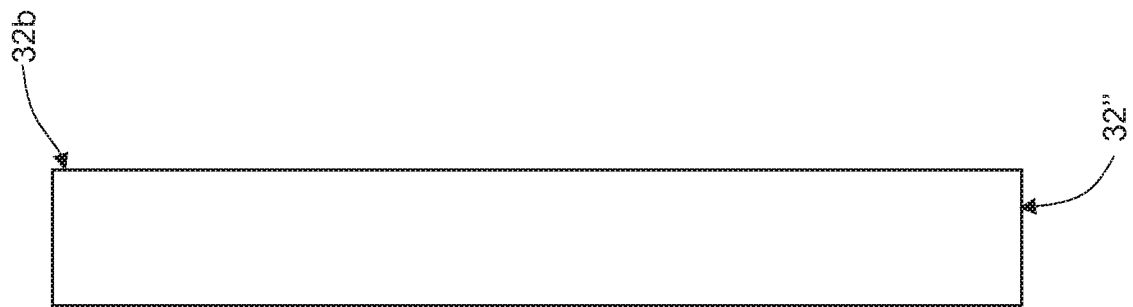


Fig. 5

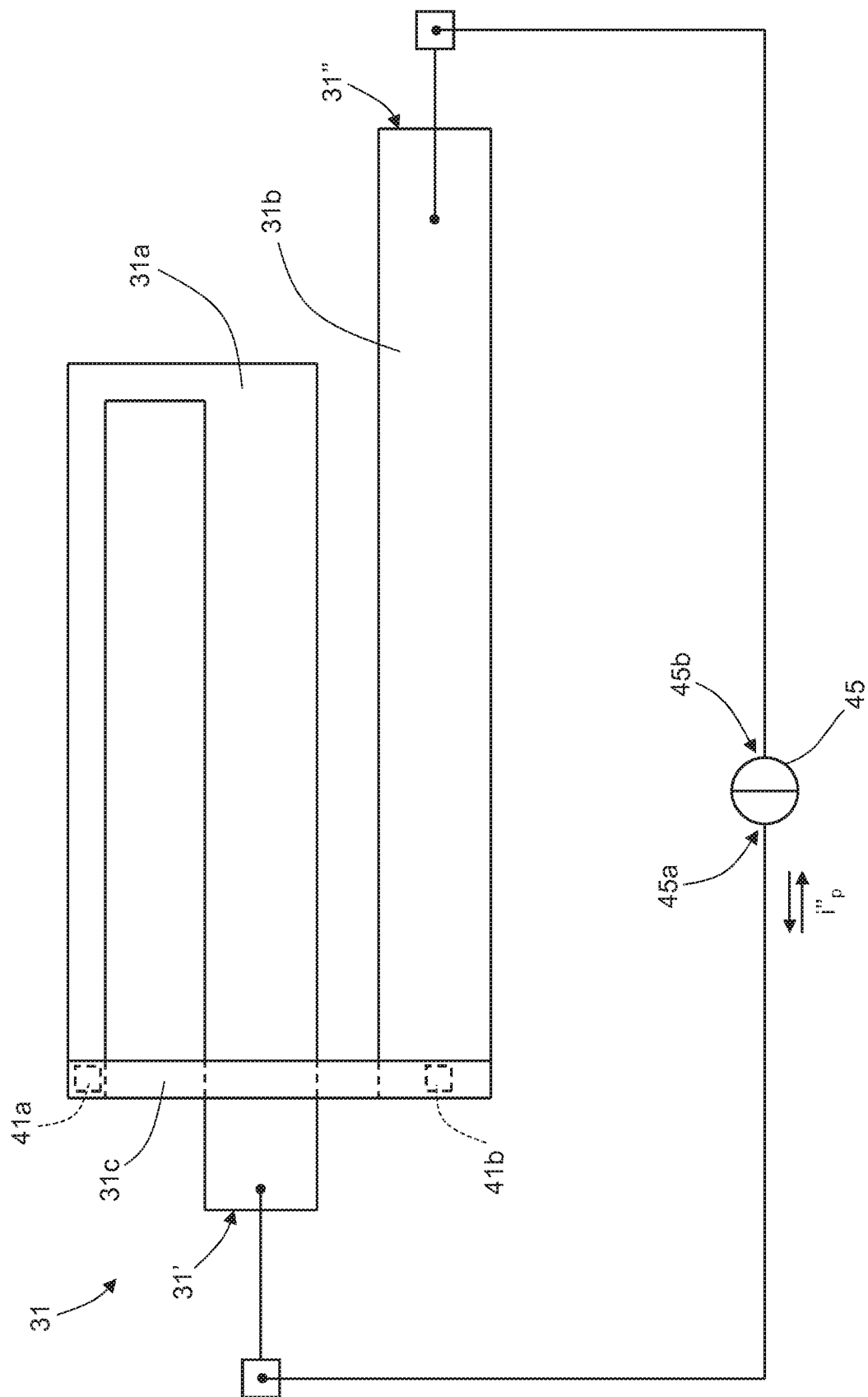
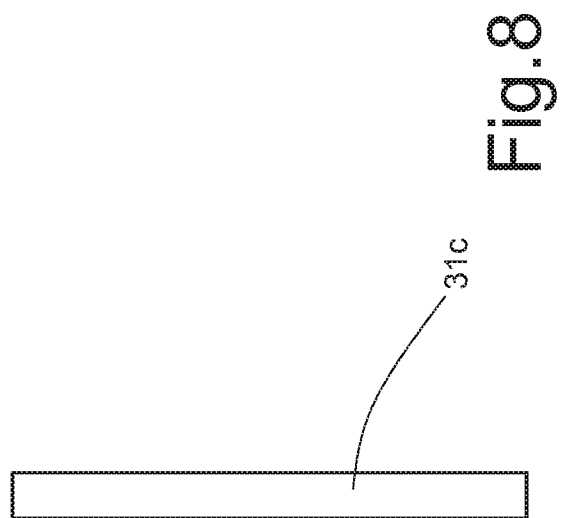
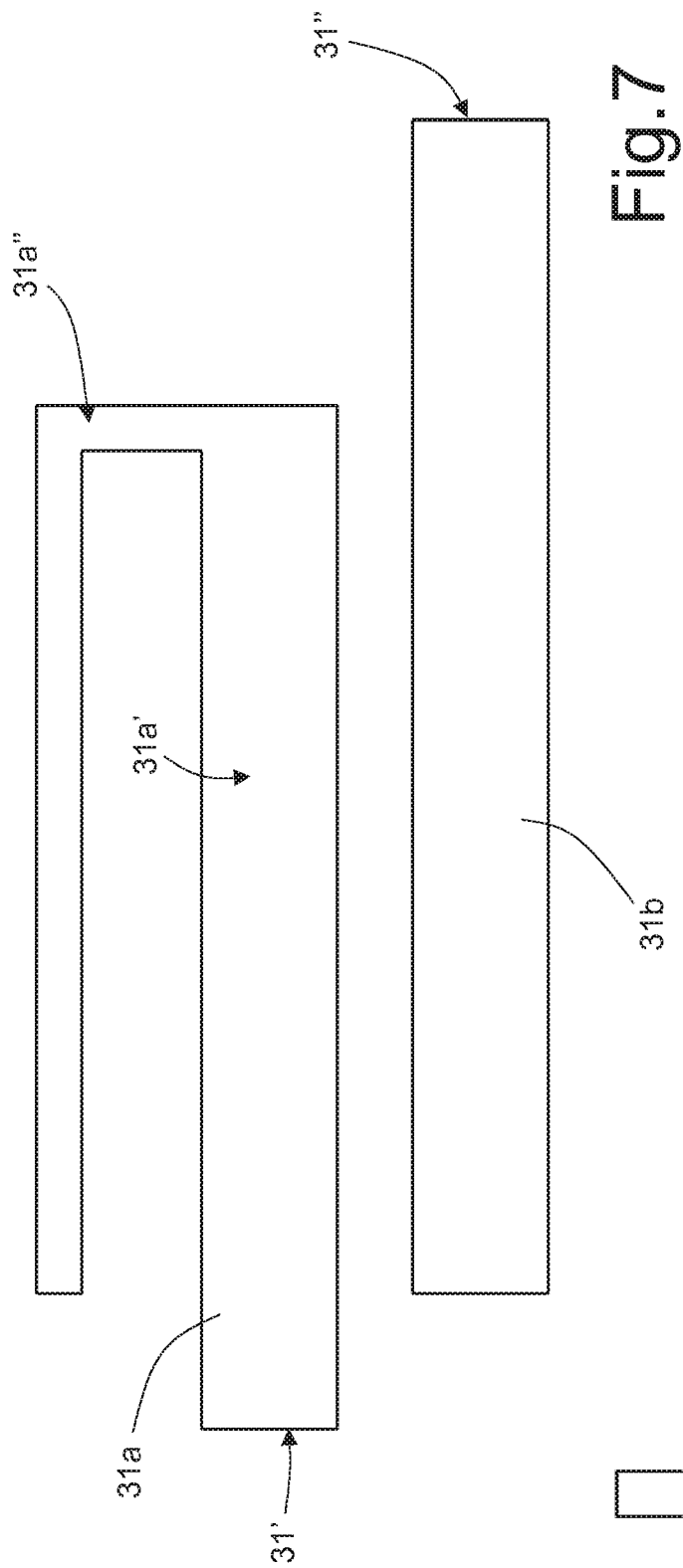


Fig.6



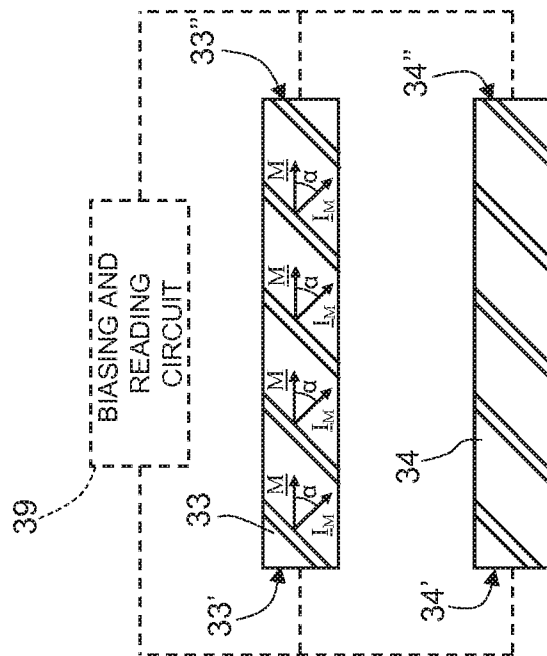


Fig. 10

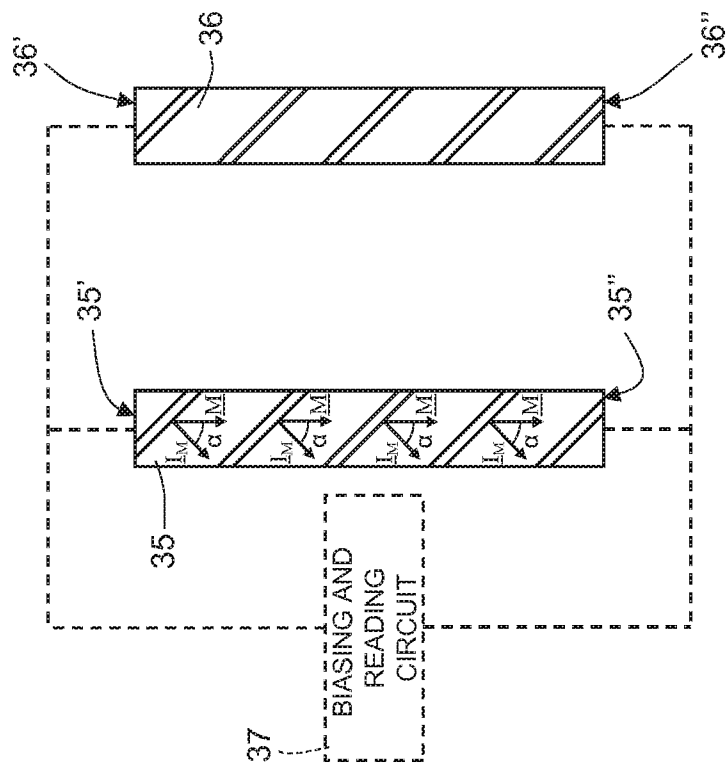


Fig. 9

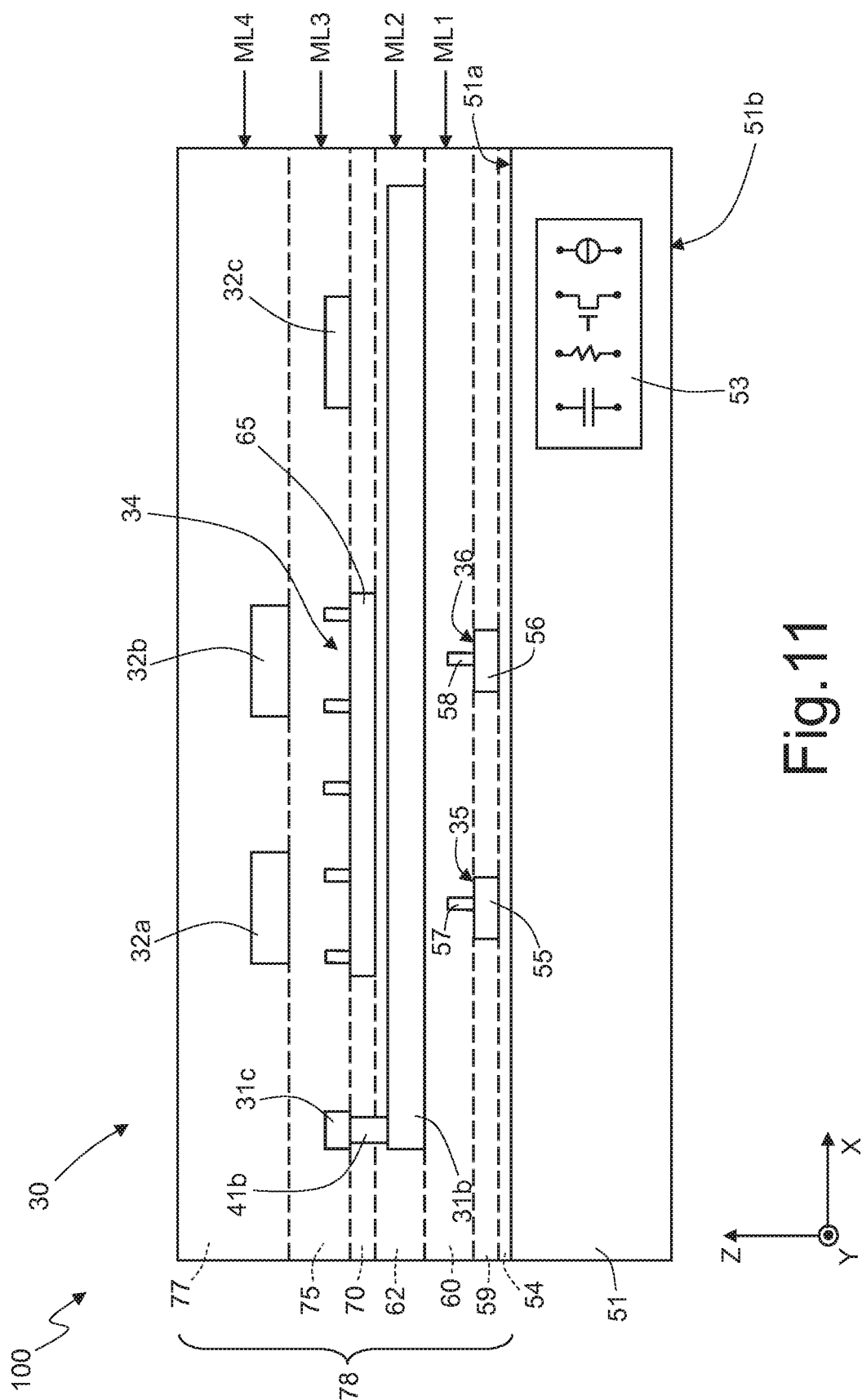


Fig.11

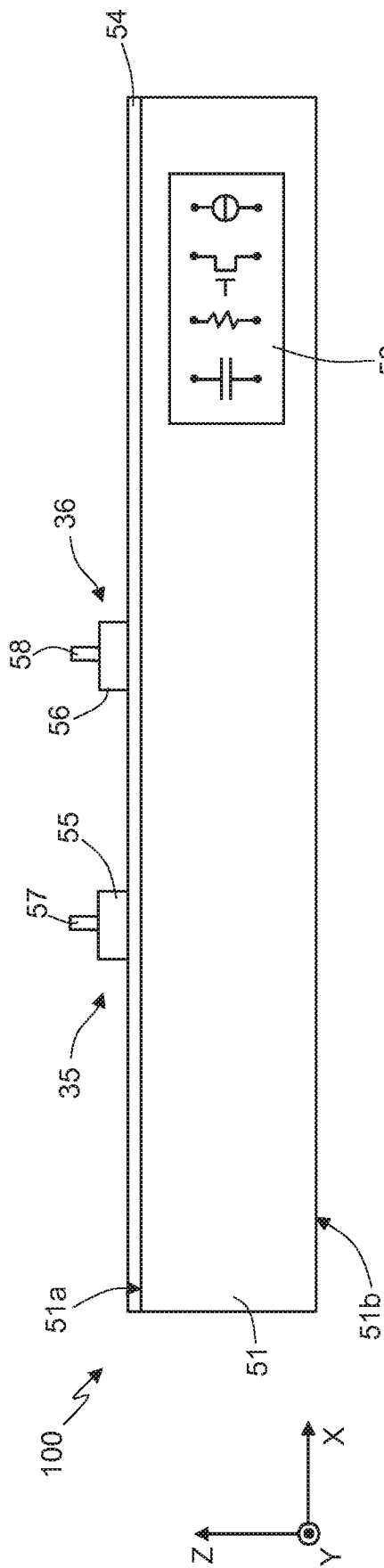


Fig. 12a

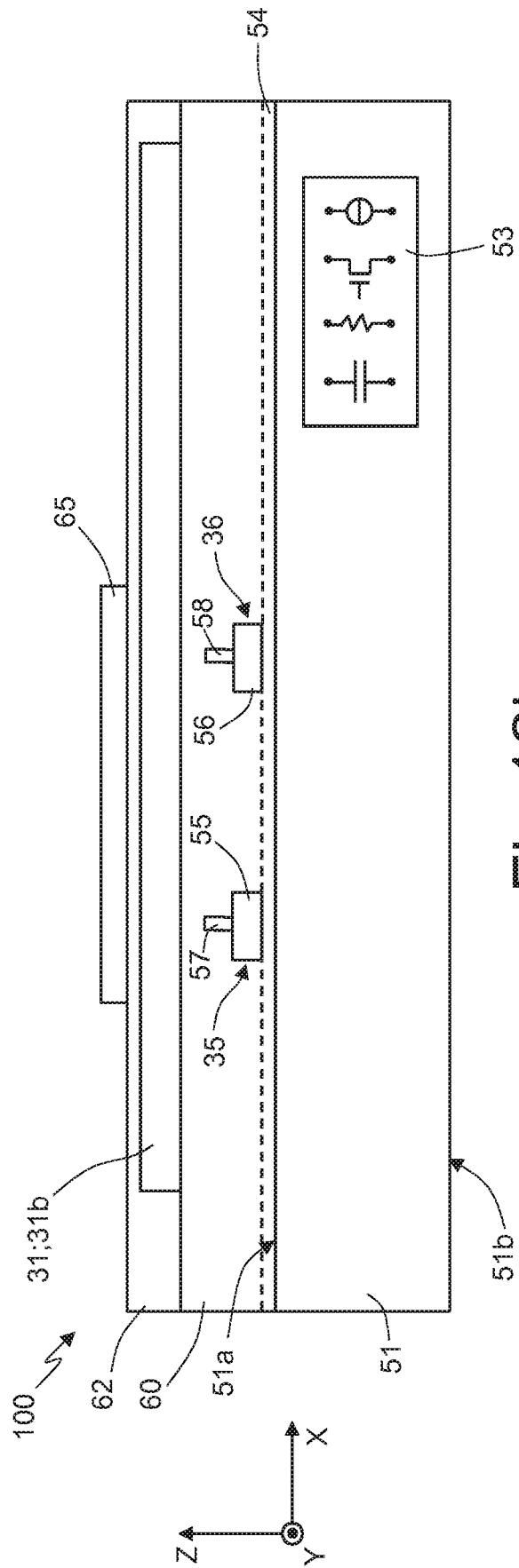


Fig. 12b

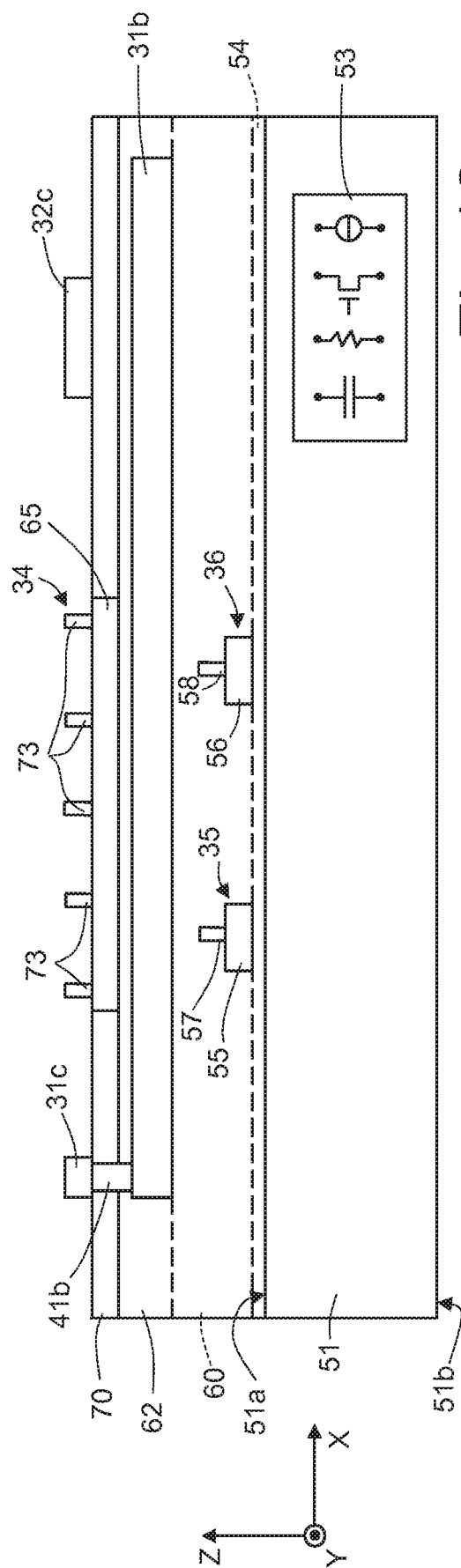


Fig. 12c

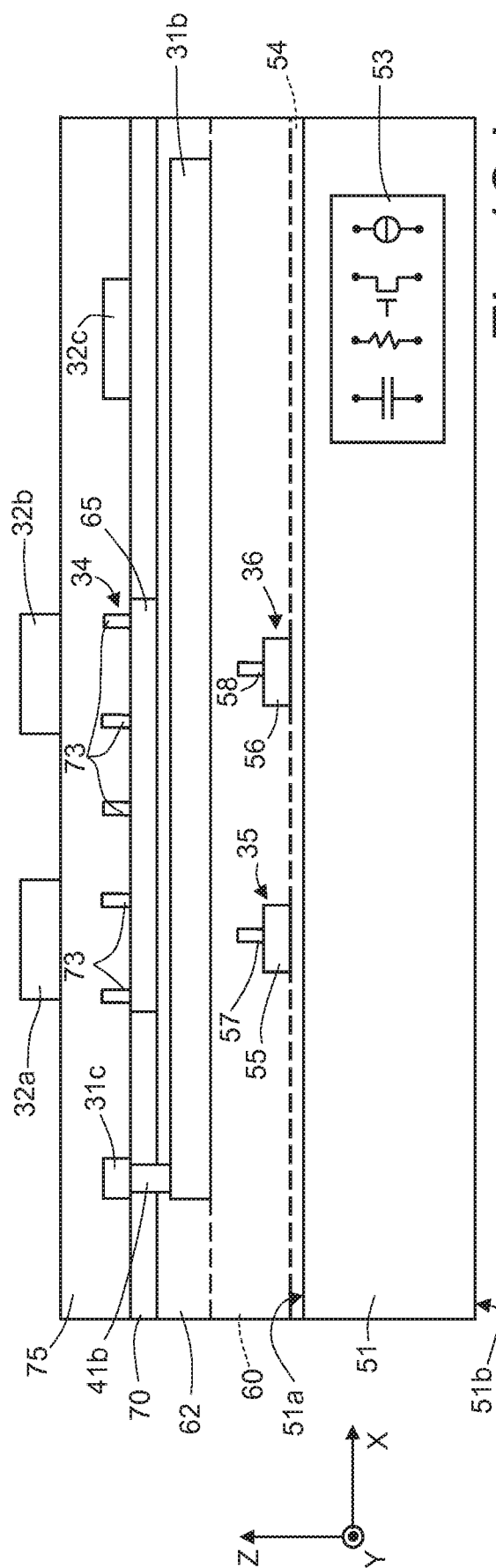


Fig. 12d

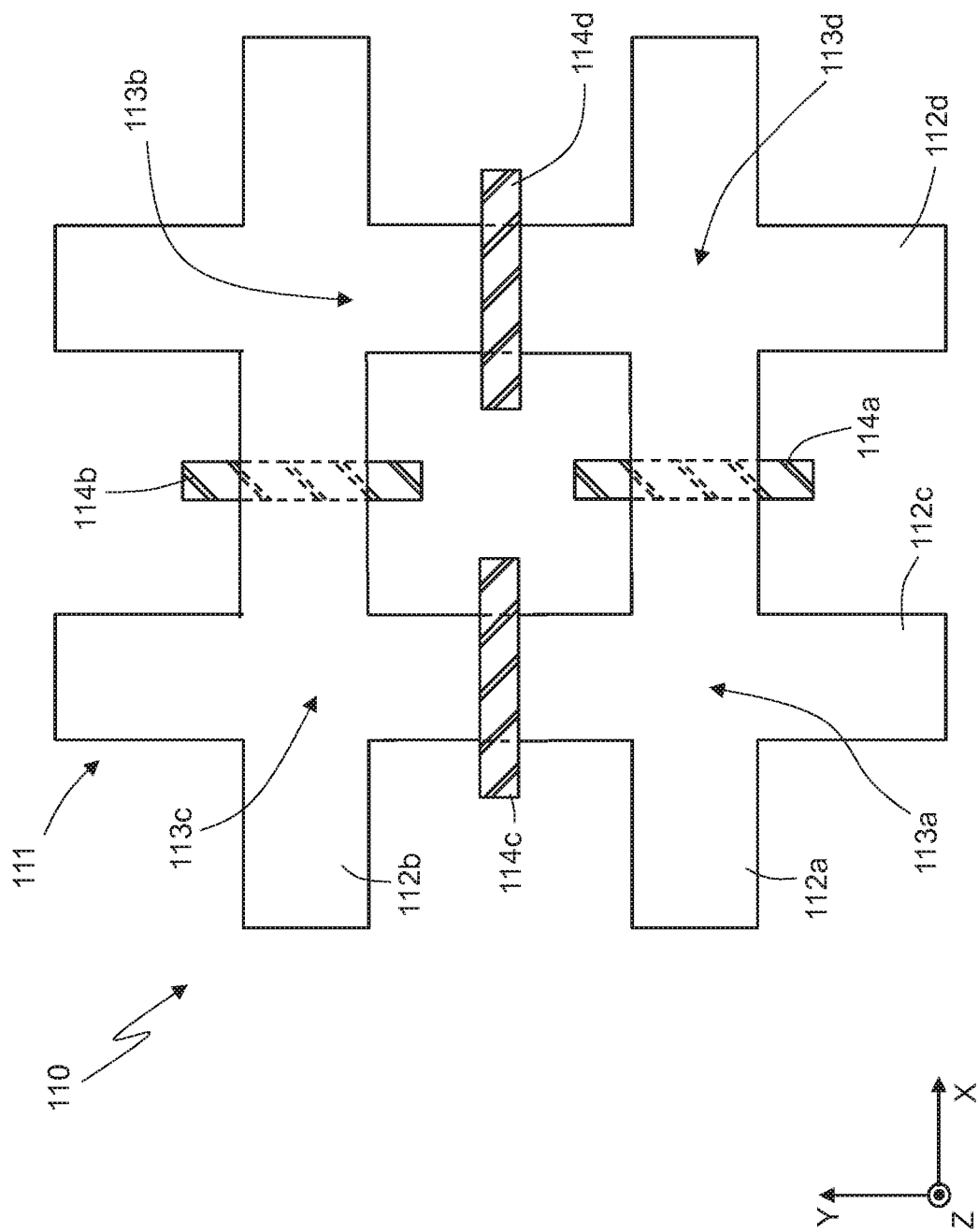


Fig.13

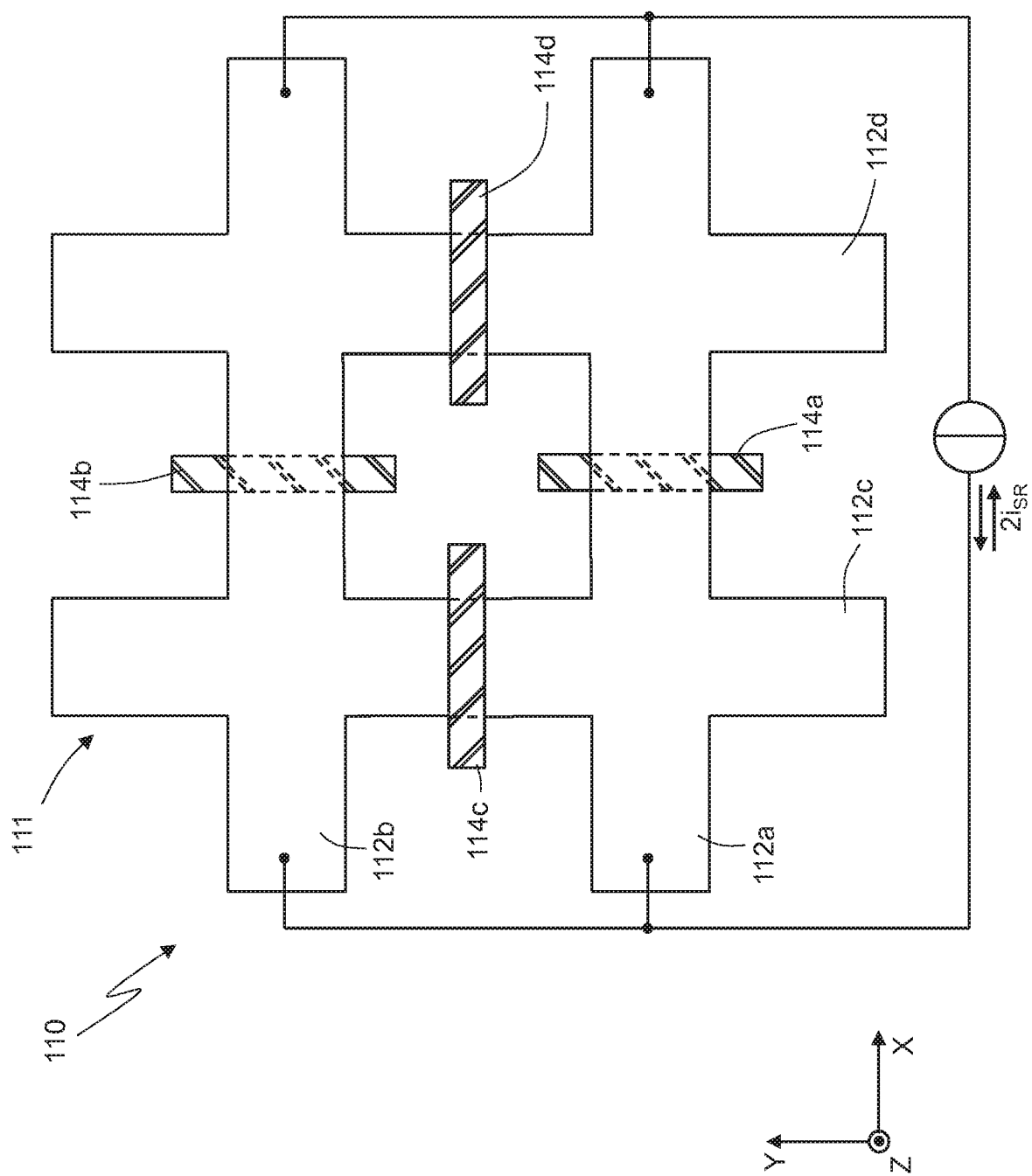


Fig. 14a

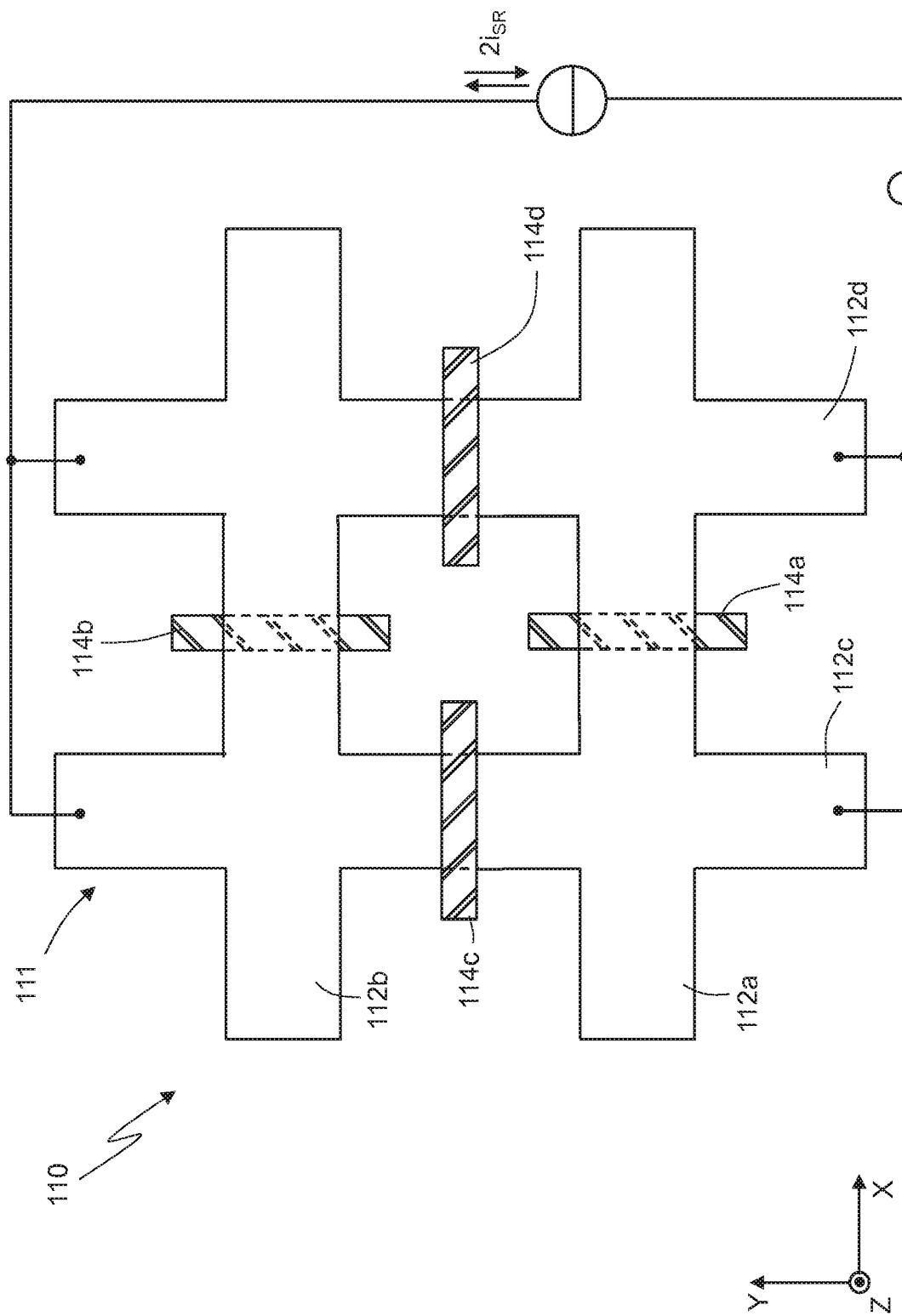


Fig. 14b

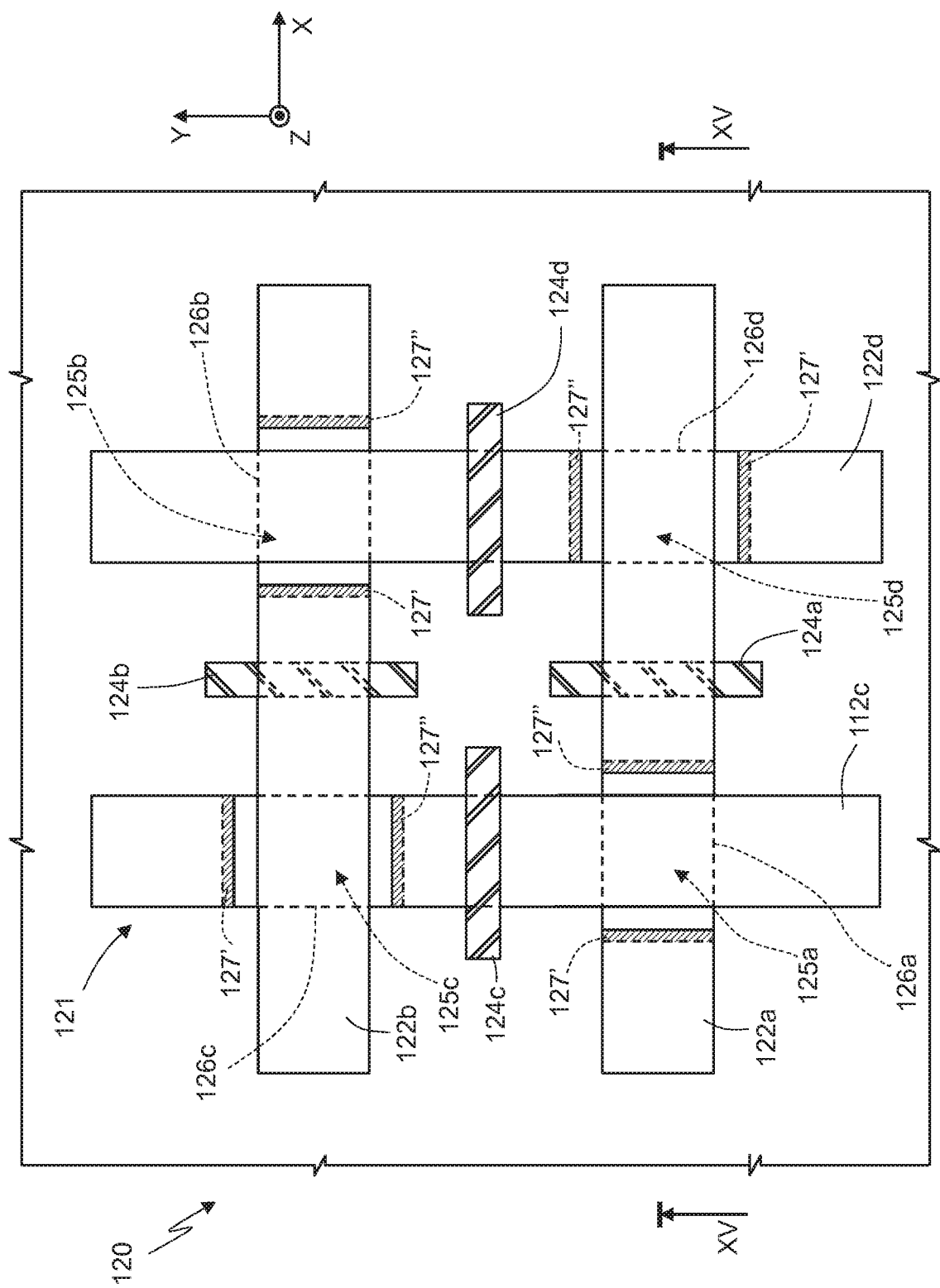


Fig.15a

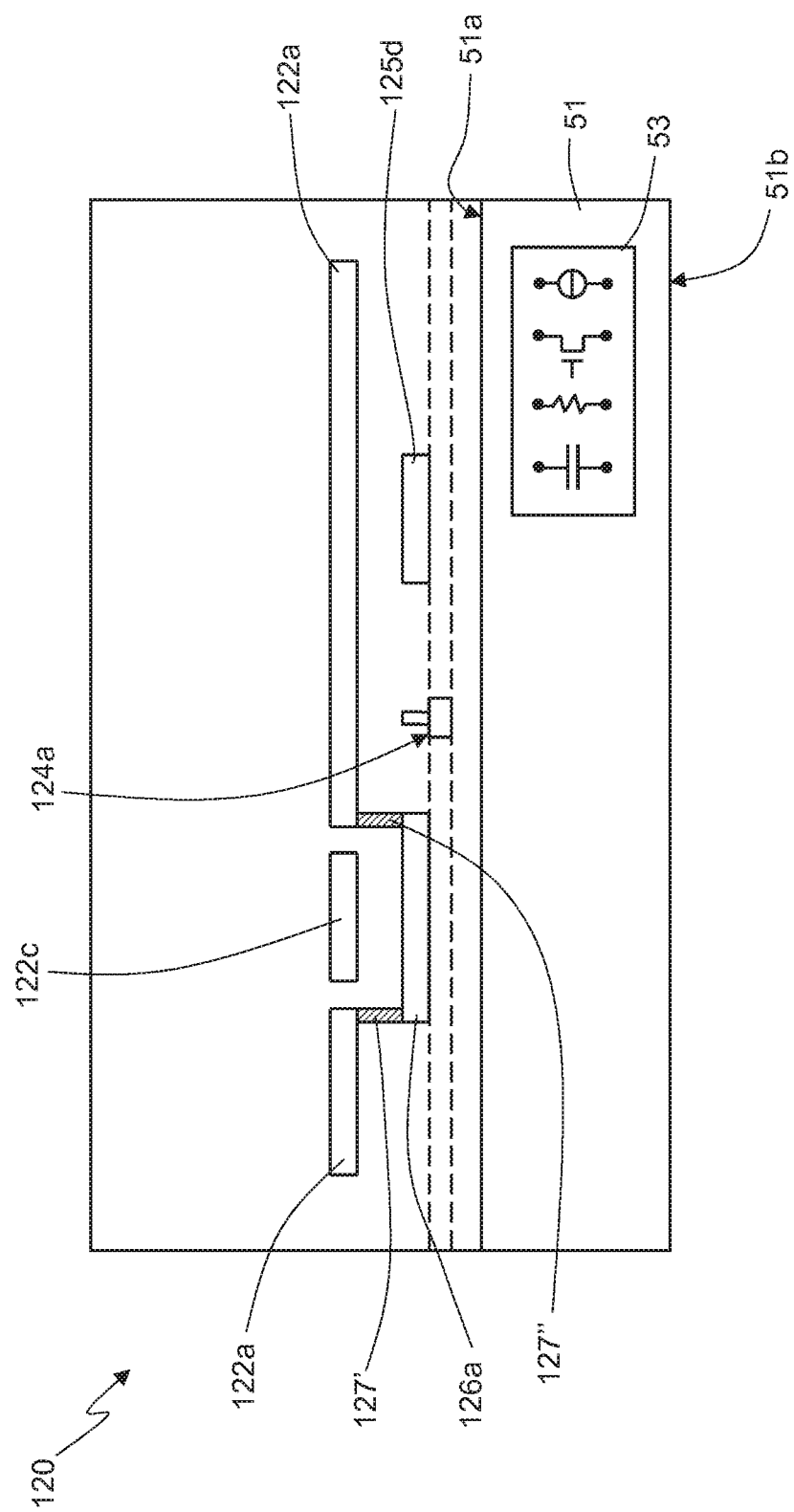


Fig.15b

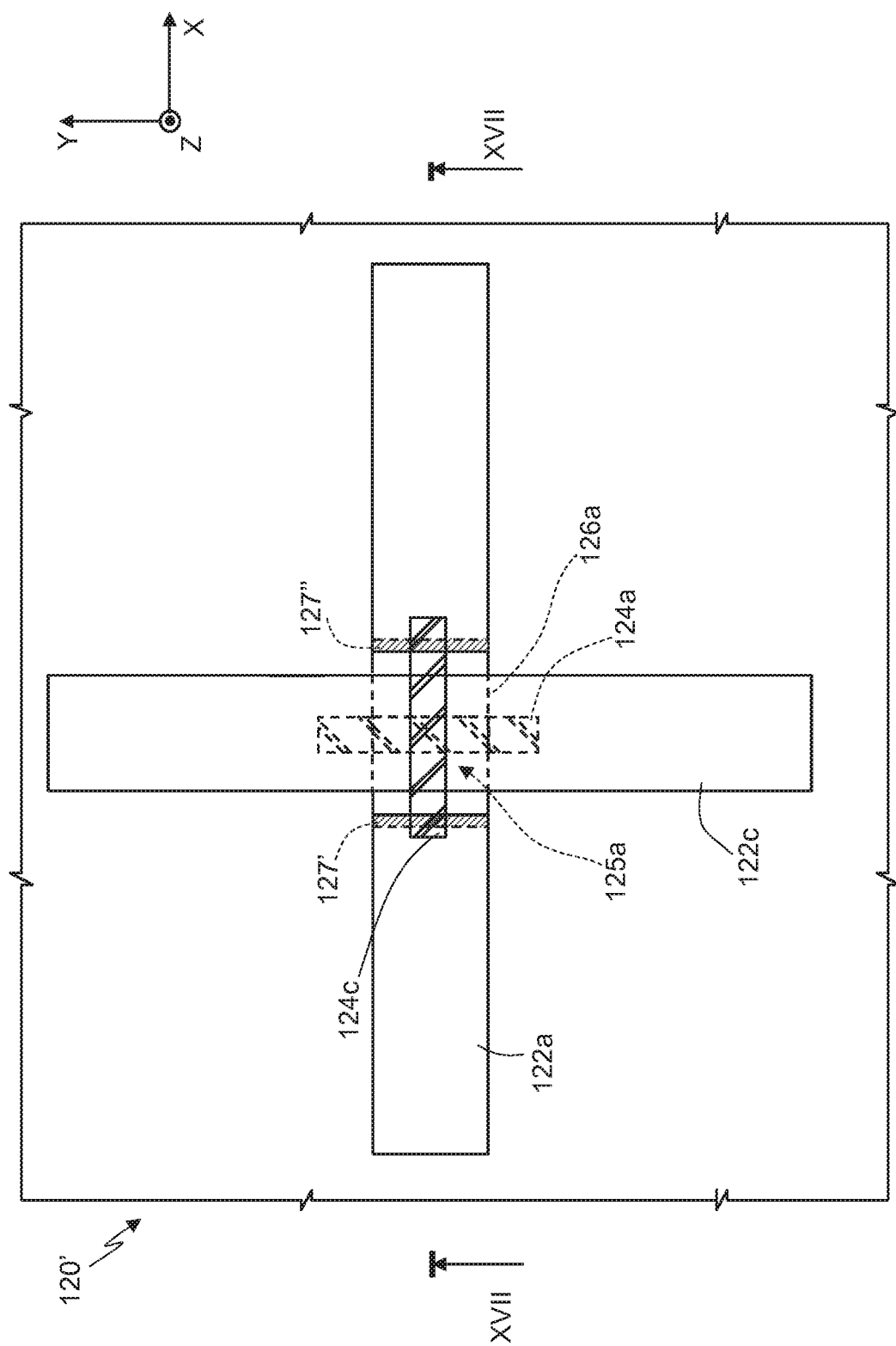


Fig.17a

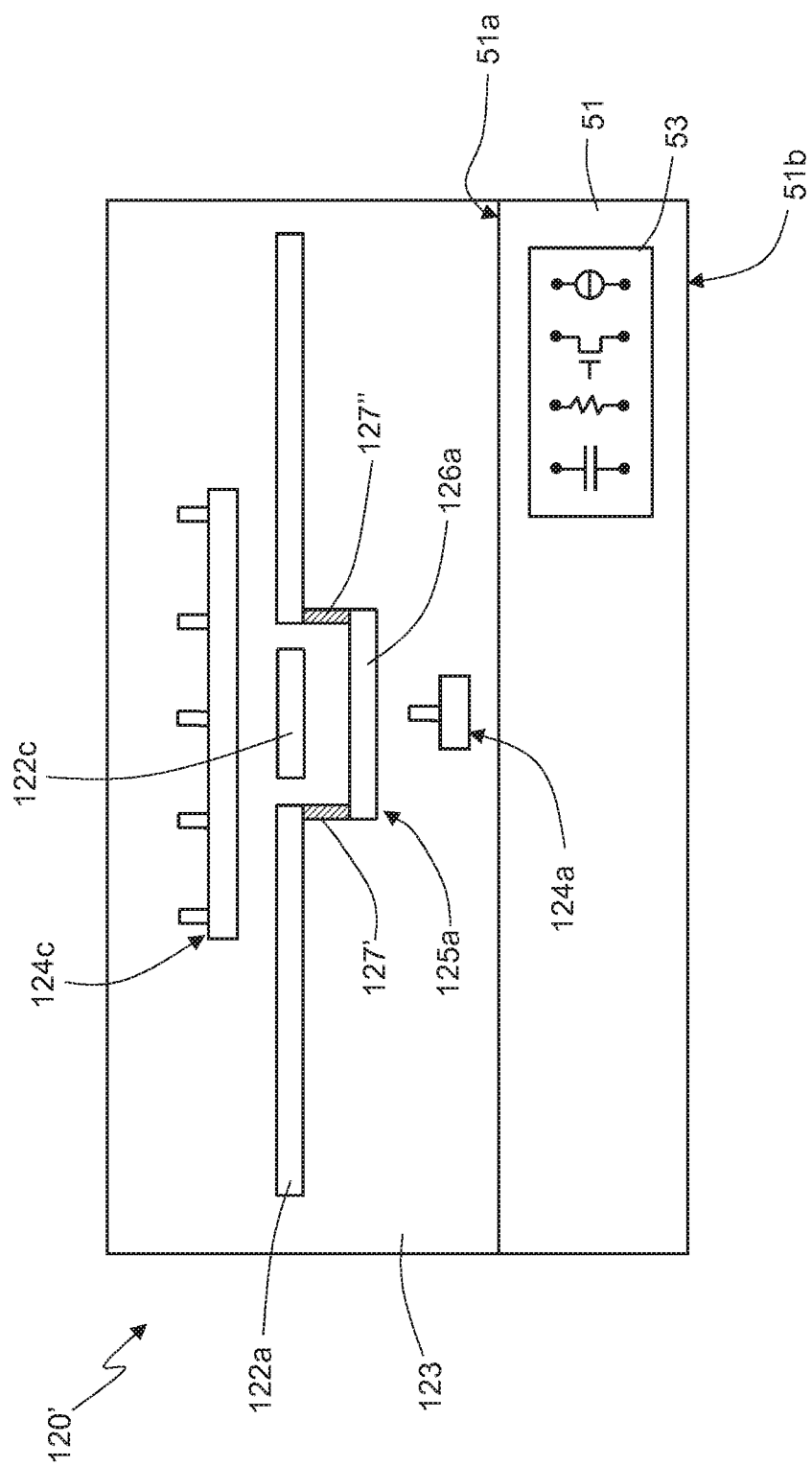


Fig.17b

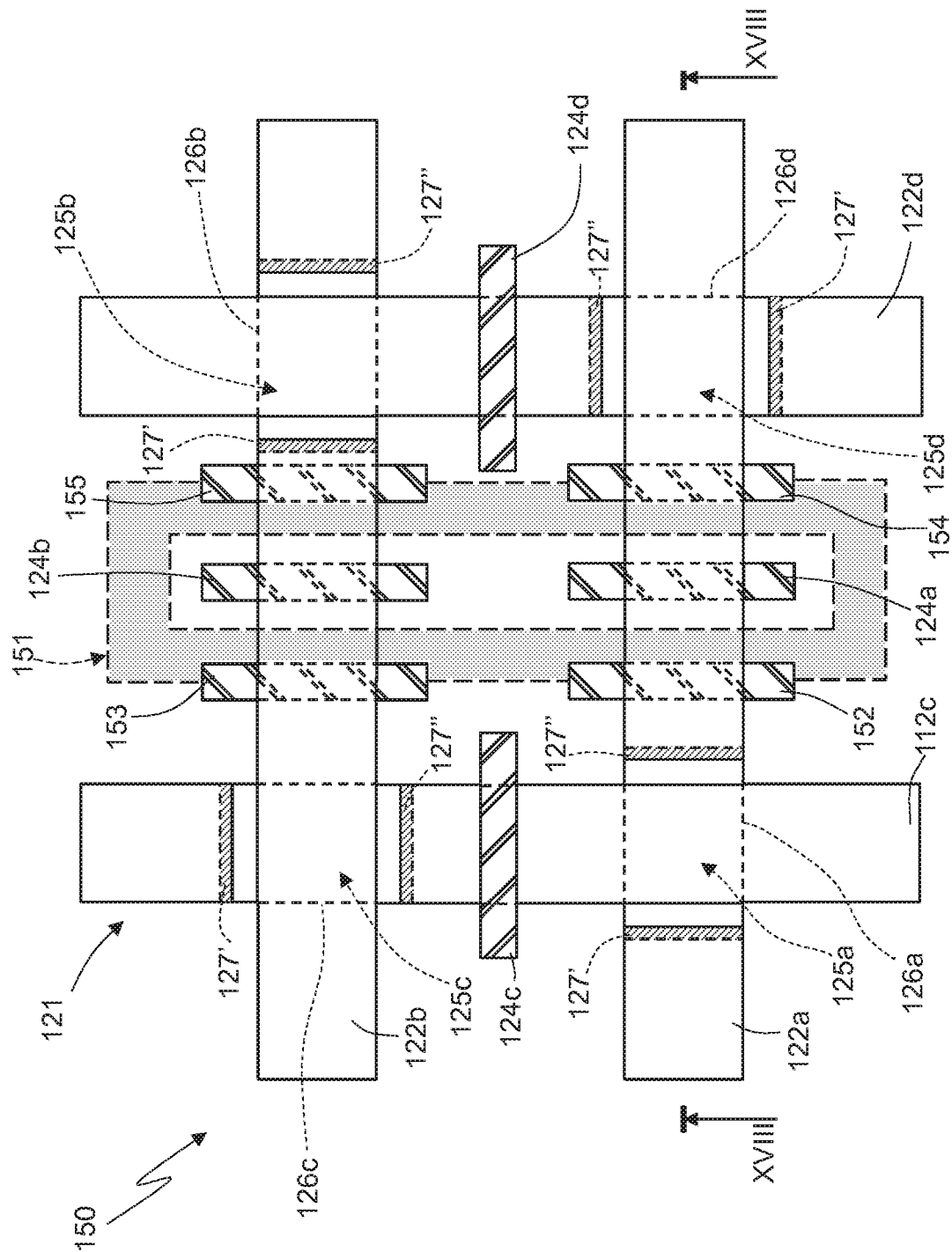


Fig. 18a

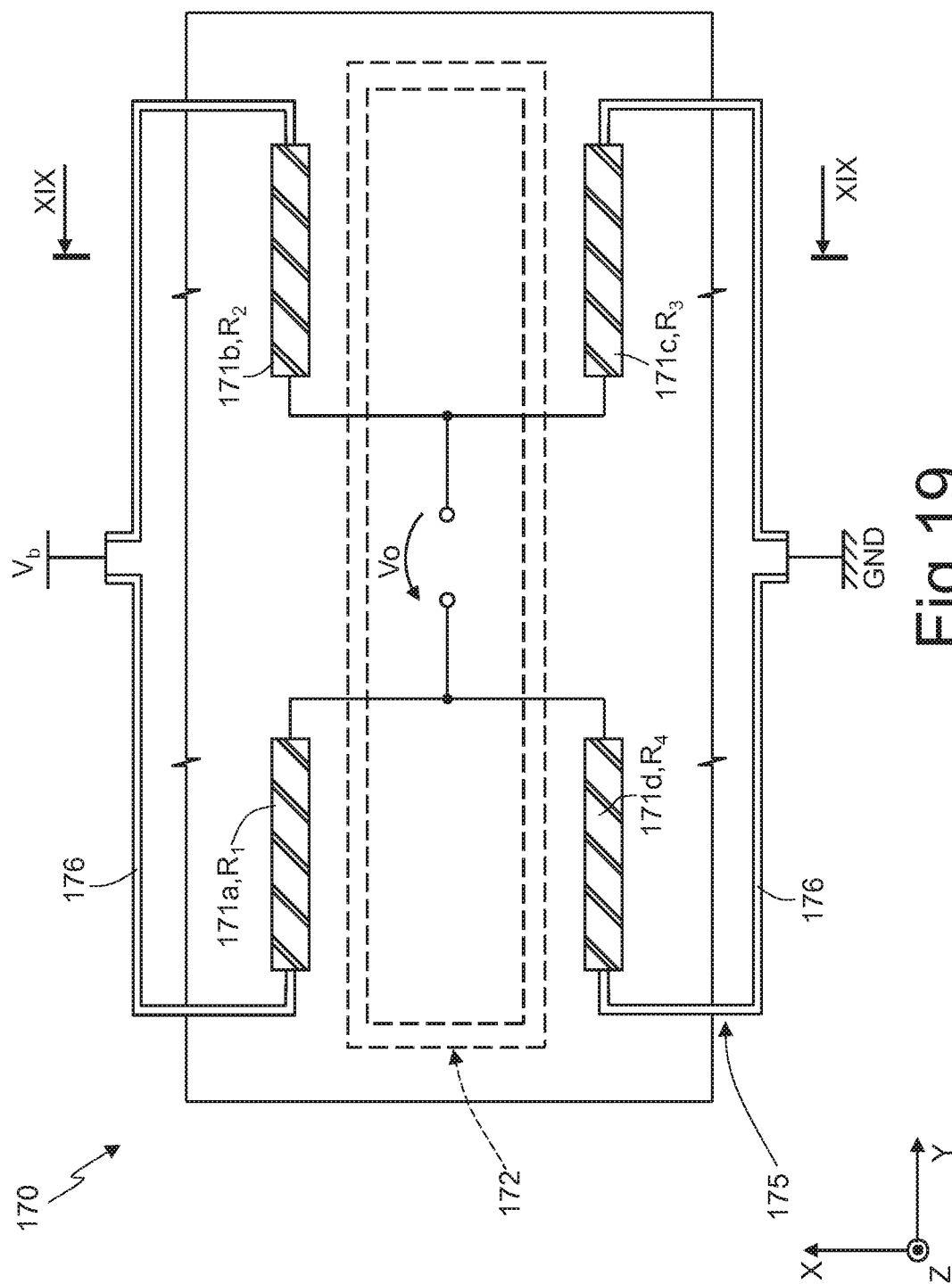


Fig.19

