



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102012902080420
Data Deposito	31/08/2012
Data Pubblicazione	03/03/2014

Classifiche IPC

Titolo

DISPOSITIVO MEMS INCLUDENTE UN ELEMENTO MOBILE ED UN SENSORE RESISTIVO, E
METODO DI GENERAZIONE DI UN SEGNALE INDICATIVO DELLA POSIZIONE
DELL'ELEMENTO MOBILE

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"DISPOSITIVO MEMS INCLUDENTE UN ELEMENTO MOBILE ED UN
SENSORE RESISTIVO, E METODO DI GENERAZIONE DI UN SEGNALE
INDICATIVO DELLA POSIZIONE DELL'ELEMENTO MOBILE"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI, 2

AGRATE BRIANZA (MB)

Inventori: DE FAZIO Marco, MURARI Bruno

* * *

La presente invenzione è relativa ad un dispositivo del tipo dei cosiddetti sistemi micro-elettromeccanici ("Micro-electromechanical systems", MEMS), il quale include un elemento mobile ed un sensore resistivo. Inoltre, la presente invenzione si riferisce ad un metodo di generazione di un segnale indicativo della posizione dell'elemento mobile.

Come è noto, sono oggi disponibili numerosi dispositivi MEMS. Ad esempio, sono noti i cosiddetti riflettori MEMS, i quali sono atti a ricevere un fascio ottico e variarne la direzione di propagazione, in modo periodico o quasi periodico. A tal fine, i riflettori MEMS includono elementi mobili formati da specchi, le cui posizioni nello spazio sono controllate elettronicamente.

In maggior dettaglio, in un generico riflettore MEMS comprendente uno specchio, il controllo della posizione dello specchio risulta di particolare importanza per consentire di scandire una porzione di spazio con un fascio ottico, il quale viene fatto incidere sullo specchio. In particolare, il controllo della posizione dello specchio risulta determinante nel caso dei riflettori MEMS risonanti, in cui, in uso, lo specchio è fatto oscillare in modo sostanzialmente periodico attorno ad una posizione di riposo, il periodo di oscillazione essendo quanto più possibile prossimo alla frequenza di risonanza dello specchio, al fine di massimizzare la distanza angolare coperta dallo specchio durante ciascuna oscillazione, e dunque massimizzare la dimensione della porzione di spazio scandito.

Ad esempio, la domanda di brevetto US2011/0109951 descrive un circuito di controllo della posizione dello specchio di un riflettore MEMS di tipo risonante, tale specchio essendo disposto in modo da ruotare, sotto l'azione di un motore di tipo elettrostatico, attorno ad un asse di rotazione. In particolare, il riflettore MEMS secondo la domanda di brevetto US2011/0109951 comprende un corpo di supporto fisso, di materiale semiconduttore, ed uno specchio, il quale è vincolato al corpo di supporto fisso mediante una prima ed una seconda molla.

Il corpo di supporto fisso comprende una prima ed una seconda sottoregione di statore, collegate rispettivamente ad un primo ed un secondo elettrodo di statore, ed una prima ed una seconda sottoregione di rotore, collegate rispettivamente ad un primo ed un secondo elettrodo di rotore. Il primo ed il secondo elettrodo di statore consentono di polarizzare, rispettivamente, la prima e la seconda sottoregione di statore, mentre il primo ed il secondo elettrodo di rotore consentono di polarizzare rispettivamente la prima e la seconda sottoregione di rotore.

Lo specchio è meccanicamente interposto tra la prima e la seconda molla, ciascuna delle quali presenta una rispettiva estremità che è vincolata al corpo di supporto fisso; in particolare, la prima e la seconda molla sono rispettivamente vincolate alla prima ed alla seconda sottoregione di rotore. Lo specchio e la prima e la seconda molla formano dunque un sistema risonante, il quale ha una rispettiva frequenza meccanica di risonanza. In generale, la frequenza meccanica di risonanza varia nel tempo, ad esempio a causa di variazioni di temperatura.

In maggior dettaglio, secondo la domanda di brevetto US2011/0109951, le tensioni degli elettrodi di rotore e degli elettrodi di statore, e conseguentemente le tensioni delle sottoregioni di rotore e di statore, sono imposte in

modo tale da far oscillare lo specchio attorno all'asse di rotazione, con una frequenza meccanica di oscillazione quanto più possibile prossima alla frequenza meccanica di risonanza. A tal fine, il primo ed il secondo elettrodo di rotore sono posti ad una tensione di polarizzazione (V_{pol}), mentre il primo ed il secondo elettrodo di statore ricevono un medesimo segnale elettrico di comando, formato da un treno di impulsi ad alta tensione.

Per far oscillare lo specchio con una frequenza meccanica di oscillazione quanto più possibile prossima alla frequenza meccanica di risonanza, occorre conoscere la frequenza meccanica di risonanza ed occorre generare gli impulsi del segnale elettrico di comando con frequenza e fase opportune, in funzione della posizione dello specchio. A tali fini, occorre determinare la posizione dello specchio, ed in particolare occorre determinare i passaggi dello specchio attraverso la posizione di riposo. Secondo la domanda di brevetto US2011/0109951, la determinazione dei passaggi dello specchio attraverso la posizione di riposo avviene sulla base di un segnale proporzionale ad una derivata nel tempo di una capacità associata allo specchio, cioè mediante una cosiddetta rilevazione di capacità ("capacitive sensing").

In dettaglio, la rilevazione della derivata della capacità associata allo specchio viene effettuata durante

periodi di monitoraggio, in cui gli elettrodi di statore sono posti a massa, attraverso un circuito elettronico. Al contrario, durante periodi cosiddetti di pilotaggio ("driving periods"), gli elettrodi di statore ricevono, ancora attraverso il circuito elettronico, gli impulsi elettrici e sono dunque posti ad una tensione positiva tale da applicare una coppia allo specchio, in modo da mantenere quest'ultimo in oscillazione. Tuttavia, tale tensione positiva è talmente elevata da causare la saturazione di un amplificatore presente all'interno del circuito elettronico, tale saturazione causando l'impossibilità di rilevare la derivata della summenzionata capacità.

Il fatto che la rilevazione della derivata della summenzionata capacità non possa avvenire durante i periodi di pilotaggio impone una limitazione alla durata dei periodi di pilotaggio, e quindi degli impulsi, i quali devono appunto essere intervallati con i periodi di monitoraggio, per consentire di aggiornare la stima della frequenza meccanica di risonanza. Pertanto, gli impulsi devono essere ad una tensione particolarmente elevata, per pilotare correttamente l'elemento mobile. Inoltre, dato il segnale proporzionale alla derivata nel tempo della summenzionata capacità, la determinazione della corrispondente posizione dello specchio richiede di disporre di un'unità di elaborazione, la quale deve

implementare algoritmi di correlazione alquanto complessi.

Il documento US 5,648,618 descrive, invece, un dispositivo MEMS in cui, al di sopra di ciascuna molla, è disposto un corrispondente piezoresistore, la cui resistenza varia in funzione della torsione cui è soggetta la rispettiva molla. Il riflettore MEMS forma quindi un sensore piezoresistivo atto a generare un segnale elettrico indicativo della posizione angolare dello specchio, sulla cui base viene controllata la posizione dello specchio. Tuttavia, a causa dell'impiego di tale sensore piezoresistivo, il riflettore MEMS si caratterizza per una certa complessità circuitale; inoltre, la fabbricazione del riflettore MEMS deve avvenire in modo tale per cui, al termine della medesima, i piezoresistori non siano soggetti a tensioni ("stress") residue.

Scopo della presente invenzione è quindi fornire un dispositivo MEMS che risolva almeno in parte gli inconvenienti dell'arte nota.

Secondo la presente invenzione vengono dunque forniti un dispositivo MEMS ed un metodo di generazione di un segnale indicativo della posizione di un elemento mobile, come definiti, rispettivamente, nelle rivendicazioni 1 e 10.

Per una migliore comprensione della presente invenzione vengono ora descritte forme di realizzazione

preferite, a puro titolo di esempi non limitativi, con riferimento ai disegni allegati, nei quali:

- la figura 1 mostra uno schema a blocchi di un sistema MEMS proiettivo;

- la figura 2 mostra schematicamente una vista dall'alto di un dispositivo MEMS;

- la figura 3 mostra schematicamente una vista prospettica del dispositivo MEMS mostrato in figura 2;

- la figura 4 mostra uno schema circuitale di un circuito elettronico di controllo; e

- la figura 5 mostra: un andamento nel tempo della posizione angolare di un elemento mobile di un dispositivo MEMS; un andamento nel tempo di un segnale elettrico di pilotaggio; e gli andamenti nel tempo di una coppia di segnali elettrici indicativi di valori di resistenza di elementi deformabili presenti nel dispositivo MEMS mostrato nelle figure 1 e 2.

Nel seguito la presente invenzione viene descritta, a titolo puramente esemplificativo, con riferimento al caso di un dispositivo MEMS atto a riflettere un fascio ottico in modo controllabile elettronicamente, e dunque includente almeno uno specchio. La presenza di tale specchio, però, non è in alcun modo necessaria ai fini della presente invenzione, la quale può dunque trovare applicazioni in campi differenti dal campo dei riflettori MEMS.

Ciò premesso, la figura 1 mostra un sistema MEMS proiettivo 20, il quale include una sorgente luminosa 22 formata da una pluralità di LED 24, ciascuno dei quali emette radiazione elettromagnetica ad una corrispondente lunghezza d'onda. Ad esempio, in figura 1 sono mostrati tre LED 24, ciascuno dei quali emette radiazione rispettivamente nell'intorno del rosso (620-750 nm), del verde (495-570 nm) e del blu (450-475 nm).

Il sistema MEMS proiettivo 20 comprende inoltre un combinatore 26, un dispositivo MEMS 30 ed uno schermo 32. Il combinatore 26 è disposto a valle della sorgente luminosa 22, in modo da ricevere la radiazione elettromagnetica emessa dai LED 24 e formare un unico fascio ottico OB1, ottenuto mediante combinazione di tale radiazione elettromagnetica. Il combinatore 26 è inoltre atto a dirigere il fascio ottico OB1 sul dispositivo MEMS 30; a sua volta, il dispositivo MEMS 30, descritto in maggior dettaglio in seguito, è atto a generare un fascio ottico riflesso OB2 e ad inviare il fascio ottico riflesso OB2 sullo schermo 32, in modo da consentire la formazione di immagini sullo schermo 32.

In dettaglio, il dispositivo MEMS 30 è atto a variare nel tempo l'orientamento nello spazio dell'asse del fascio ottico riflesso OB2, in modo da scandire periodicamente porzioni dello schermo 32; in particolare, il fascio ottico

riflesso OB2 scandisce linearmente una porzione, eventualmente intera, dello schermo 32.

Come mostrato nelle figure 2 e 3, il dispositivo MEMS 30 comprende un corpo di supporto fisso 40, di materiale semiconduttore, il quale include una prima ed una seconda regione semiconduttrice 42, 43, tra loro isolate elettricamente. In particolare, il dispositivo MEMS 30 ha un asse H; inoltre, assumendo un sistema di riferimento ortogonale formato da tre assi x, y, z e tale per cui l'asse z è parallelo all'asse H, la prima regione semiconduttrice 42 comprende una prima ed una seconda sottoregione di rotore 44, 46, disposte diametralmente opposte rispetto all'asse H, lungo un asse O parallelo all'asse x. Inoltre, la seconda regione semiconduttrice 43 comprende una prima ed una seconda sottoregione di statore 48, 50, disposte diametralmente opposte rispetto all'asse H, lungo una direzione parallela all'asse y. Nella forma di realizzazione mostrata in figura 2, ciascuna tra la prima e la seconda sottoregione di statore 48, 50 forma una pluralità di elementi allungati 49, ai quali ci si riferisce in seguito come alle dita 49. Le dita 49 si estendono parallelamente all'asse y e sono organizzate in una prima ed una seconda pluralità. In particolare, le dita della prima pluralità si estendono a partire dalla prima sottoregione di statore 48, in direzione della seconda

sottoregione di statore 50, e sono tra loro allineate parallelamente all'asse x, mentre le dita della seconda pluralità si estendono a partire dalla seconda sottoregione di statore 50, in direzione della prima sottoregione di statore 48, e sono anch'esse allineate parallelamente all'asse x.

Il corpo di supporto fisso 40 definisce una cavità 52. Inoltre, il dispositivo MEMS 30 comprende un corpo mobile 54, il quale è vincolato alla prima ed alla seconda sottoregione di rotore 44, 46 ed è sospeso al di sopra della cavità 52.

Il corpo mobile 54 è formato da un primo ed un secondo elemento deformabile 56, 58, nonché da un elemento mobile 60, il quale è collegato tra il primo ed il secondo elemento deformabile 56, 58; più in particolare, l'elemento mobile 60, il primo ed il secondo elemento deformabile 56, 58 e la prima e la seconda sottoregione di rotore 44, 46 formano un unico pezzo, cioè appartengono ad una struttura monolitica di materiale semiconduttore.

In dettaglio, una prima estremità del primo elemento deformabile 56 è vincolata alla prima sottoregione di rotore 44, mentre una prima estremità del secondo elemento deformabile 58 è vincolata alla seconda sottoregione di rotore 46. Inoltre, una prima ed una seconda estremità dell'elemento mobile 60 sono rispettivamente solidali con

una seconda estremità del primo elemento deformabile 56 e con una seconda estremità del secondo elemento deformabile 58.

In maggior dettaglio, il primo ed il secondo elemento deformabile 56, 58 e l'elemento mobile 60 sono formati da materiale semiconduttore. Inoltre, in condizioni di riposo, ciascuno tra il primo ed il secondo elemento deformabile 56, 58 ha forma, ad esempio, di un parallelepipedo, la cui dimensione parallela all'asse x è maggiore rispetto alle corrispondenti dimensioni lungo gli assi y e z; ad esempio, la dimensione parallela all'asse x è maggiore di almeno cinque volte rispetto alle dimensioni lungo gli assi y e z. In condizioni di riposo, ciascuno tra il primo ed il secondo elemento deformabile 56, 58 ha due facce disposte in piani paralleli al piano xy.

L'elemento mobile 60 porta uno specchio 65, formato ad esempio da un film di materiale metallico, quale ad esempio rame. Inoltre, nella forma di realizzazione mostrata in figura 2, l'elemento mobile 60 definisce una rispettiva pluralità di dita 61, le quali si estendono parallelamente all'asse y e sono disposte in modo tale per cui, in condizioni di riposo, esse sono interdigitate con le dita 49 formate dalla prima e dalla seconda sottoregione di statore 48, 50.

Ai fini pratici, il primo ed il secondo elemento

deformabile 56, 58 fungono, rispettivamente, da prima e seconda molla, dal momento che ciascuno di essi può subire una torsione attorno all'asse 0, per i motivi descritti in seguito, e successivamente ritornare nella posizione assunta in condizioni di riposo. Infatti, la forma del primo e del secondo elemento deformabile 56, 58 conferisce ad essi una bassa rigidità torsionale, ad esempio compresa tra 10^{-4} e 10^{-3} Newton/rad. L'elemento mobile 60 e lo specchio 65 possono dunque ruotare attorno all'asse 0.

Il dispositivo MEMS 30 comprende inoltre un primo ed un secondo elettrodo di statore 62, 64, i quali sono disposti a contatto con la prima e la seconda sottoregione di statore 48, 50 e consentono di polarizzare queste ultime. In aggiunta, il dispositivo MEMS 30 comprende un primo ed un secondo elettrodo di rotore 66, 68, i quali sono disposti a contatto con la prima e la seconda sottoregione di statore 44, 46 e consentono di polarizzare queste ultime.

Il dispositivo MEMS 30 comprende inoltre un circuito elettronico di controllo 70, mostrato in figura 4.

Il circuito elettronico di controllo 70 comprende un condensatore di ingresso 72 avente un primo ed un secondo terminale, ed un generatore di corrente 74, il quale è collegato tra un nodo di alimentazione ed il primo terminale del condensatore di ingresso 72 e genera, in uso,

una corrente di riferimento I_R di tipo continuo. Il nodo di alimentazione è posto ad una tensione di alimentazione $+V_{al}$ ad esempio pari a 3 Volt. Inoltre, la corrente di riferimento I_R è ad esempio pari a 1 mA.

Il circuito elettronico di controllo 70 comprende inoltre un primo amplificatore 76, il cui ingresso è collegato al secondo terminale del condensatore di ingresso 72, ed un filtro passa basso 78, il cui ingresso è collegato all'uscita del primo amplificatore 76.

Il circuito elettronico di controllo 70 comprende inoltre un traslatore di fase ("phase-shifter") 80, il cui ingresso è collegato all'uscita del filtro passa basso 78, ed un comparatore 82, il quale ha due ingressi ed un'uscita; un primo ingresso del comparatore 82 è collegato all'uscita del traslatore di fase 80, mentre un secondo ingresso del comparatore 82 è posto ad una tensione di riferimento V_{ref} . Il circuito elettronico di controllo 70 comprende inoltre un secondo amplificatore 84, il cui ingresso è collegato all'uscita del comparatore 82. L'uscita del secondo amplificatore 84 è collegata al primo ed al secondo elettrodo di statore 62, 64.

Il primo elettrodo di rotore 66 è collegato al primo terminale del condensatore di ingresso 72, e dunque al generatore di corrente 74, in maniera tale per cui, in uso, la corrente di riferimento I_R viene iniettata nel primo

elettrodo di rotore 66. La corrente di riferimento I_R fluisce dunque attraverso il primo elemento deformabile 56, l'elemento mobile 60 ed il secondo elemento deformabile 58, fino a giungere al secondo elettrodo di rotore 68, il quale è posto a massa. Senza alcuna perdita di generalità, si suppone dunque che il secondo elettrodo di rotore 68 sia connesso a massa senza interposizione di alcun resistore. Si assume inoltre, sempre senza alcuna perdita di generalità, che ciascuno tra il primo ed il secondo elettrodo di rotore 66, 68 sia ideale, e quindi abbia resistenza nulla.

Il primo ed il secondo elemento deformabile 56, 58 sono elettricamente equivalenti ad un primo e ad un secondo resistore variabile R_{56} , R_{58} , i cui valori di resistenza dipendono dalle corrispondenti torsioni cui sono soggetti il primo ed il secondo elemento deformabile 56, 58; in particolare, ciò è dovuto al fatto che la resistenza di ciascun elemento deformabile è proporzionale allo stress meccanico cui l'elemento deformabile è soggetto. Le resistenze del primo e del secondo resistore variabile R_{56} , R_{58} sono dunque proporzionali al modulo della distanza angolare θ dell'elemento mobile 60 rispetto alla posizione assunta in condizioni di riposo, alla quale ci si riferisce anche come alla posizione di riposo. Ne consegue che il primo resistore variabile R_{56} è collegato tra il primo

terminale del condensatore di ingresso 72 ed un nodo N, mentre il secondo resistore variabile R_{58} è collegato tra il nodo N e la massa. Il nodo N corrisponde elettricamente all'elemento mobile 60, sul quale non vi è sostanzialmente alcuna caduta di potenziale, o comunque si manifesta una caduta di potenziale che non dipende dalla posizione angolare dell'elemento mobile 60. Nel seguito, per semplicità e senza alcuna perdita di generalità, si assume che sull'elemento mobile 60 non si verifichi alcuna caduta di potenziale.

In pratica, l'elemento mobile 60 ed il primo ed il secondo elemento deformabile 56, 58 formano un circuito serie collegato tra il primo ed il secondo elettrodo di rotore 66, 68, la cui resistenza R_{tot} è pari alla somma delle resistenze del primo e del secondo resistore variabile R_{56} , R_{58} . Pertanto, la resistenza R_{tot} ha una parte variabile, che è proporzionale alla distanza angolare dell'elemento mobile 60 dalla posizione di riposo, ed una parte continua, eventualmente nulla.

Inoltre, la corrente di riferimento I_R ed il primo ed il secondo elemento deformabile 56, 58 sono tali per cui, anche in condizioni di torsione elevata, cioè prossima alla rottura degli elementi deformabili, la tensione sul primo terminale del condensatore di ingresso 72, e dunque a maggior ragione la tensione sull'elemento mobile 60, non

supera i 2 Volt.

Le dita 49 della prima e della seconda sottoregione di statore 48, 50 formano, insieme alle dita 61 dell'elemento mobile 60, un condensatore variabile C_{var} , la cui capacità è inversamente proporzionale alla distanza angolare θ dell'elemento mobile 60 rispetto alla posizione assunta in condizioni di riposo. Il condensatore variabile C_{var} è dunque collegato tra l'uscita del secondo amplificatore 84 ed il nodo N.

Indicando come nodo di ingresso IN il primo terminale del condensatore di ingresso 72, su tale nodo di ingresso IN si genera, in uso, un segnale di ingresso che è proporzionale alla resistenza R_{tot} , cioè alla caduta di tensione sul primo e sul secondo elemento deformabile 56, 58, e dunque dipende dalla distanza angolare θ dell'elemento mobile 60. Pertanto, il segnale di ingresso è indicativo della posizione dell'elemento mobile 60, e quindi dello specchio 65. Un esempio della correlazione esistente tra la distanza angolare θ dell'elemento mobile 60 ed il segnale di ingresso è mostrato in figura 5, dove il segnale di ingresso è indicato con V_{RES} . In altre parole, il segnale di ingresso V_{RES} è proporzionale alla tensione presente tra il primo ed il secondo elettrodo di rotore 66, 68, e quindi alla tensione presente tra la prima e la seconda sottoregione di rotore 44, 46.

Sul secondo terminale del condensatore di ingresso 72 è presente un primo segnale intermedio, il quale viene amplificato dal primo amplificatore 76, che genera un secondo segnale intermedio. Il secondo segnale intermedio viene filtrato dal filtro passa basso 78, che genera un terzo segnale intermedio, filtrando eventuali picchi del secondo segnale intermedio, questi ultimi essendo causati ad esempio dall'applicazione del segnale di pilotaggio V_p agli elettrodi di statore. Il traslatore di fase 80 genera un quarto segnale intermedio, il quale ha fase ritardata di 90° rispetto alla fase del terzo segnale intermedio; a tal fine, ed in modo di per sé noto, il traslatore di fase 80 può essere formato, ad esempio, da un anello ad aggancio di fase di tipo analogico. Un esempio di quarto segnale intermedio è mostrato ancora in figura 5, dove è indicato con V_{90} .

Il comparatore 82 compara il quarto segnale intermedio con la tensione di riferimento V_{ref} , la quale è posta pari, ad esempio, al valore medio del quarto segnale intermedio. In particolare, ogni qual volta la tensione del quarto segnale intermedio supera la tensione di riferimento V_{ref} , il comparatore 82 genera un fronte di salita di un segnale preliminare V_{pre} in uscita dal comparatore 82 stesso; inoltre, ogni qual volta la tensione del quarto segnale intermedio scende al di sotto della tensione di riferimento

V_{ref} , il comparatore 82 genera un fronte di discesa del segnale preliminare V_{pre} .

Il segnale preliminare V_{pre} è amplificato dal secondo amplificatore 84, il quale genera un segnale di pilotaggio V_p , il quale è formato da un treno di impulsi. Ciascun impulso ha una tensione positiva dell'ordine di, ad esempio, 150-200 Volt, in maniera tale per cui, quando un impulso viene applicato al primo ed al secondo elettrodo di statore 62, 64, l'elemento mobile 60 si trova ad una tensione sensibilmente inferiore rispetto alla tensione della prima e della seconda sottoregione di statore 48, 50, ed in particolare inferiore di almeno 20 Volt, preferibilmente di 50 Volt, per qualsiasi valore della distanza angolare θ dell'elemento mobile 60. Si genera dunque una forza elettrostatica che tende ad attrarre tra loro le piastre del condensatore variabile C_{var} , e cioè l'elemento mobile e le sottoregioni di statore. Inoltre, indicando con f_0 la frequenza meccanica di oscillazione dell'elemento mobile 60, si verifica che ciascuno tra il quarto segnale intermedio, il segnale preliminare V_{pre} ed il segnale di pilotaggio V_p ha una frequenza elettrica pari a $2*f_0$.

In dettaglio, il segnale di pilotaggio V_p (mostrato in figura 5) ha un duty cycle pari al 50% e viene fornito dal secondo amplificatore 84 sul primo e sul secondo elettrodo

di statore 62, 64. Il primo ed il secondo elettrodo di statore 62, 64 ricevono dunque gli impulsi elettrici generati dal secondo amplificatore 84. Inoltre, il segnale di pilotaggio V_p è sincrono con il quarto segnale intermedio V_{90} e con il segnale di ingresso V_{RES} .

In maggior dettaglio, indicando con θ_{max} il modulo della massima distanza angolare dalla posizione di riposo assunta dall'elemento mobile 60 durante una singola oscillazione, ciascun impulso elettrico si estende temporalmente durante un intervallo di tempo in cui la distanza angolare dell'elemento mobile 60 è compresa nell'intervallo $[\theta_{max}, 0^\circ]$ o $[-\theta_{max}, 0^\circ]$; pertanto, durante ciascun impulso elettrico, non si verifica alcun attraversamento della posizione di riposo da parte dell'elemento mobile 60. Esiste dunque una relazione di fase tra il segnale di pilotaggio V_p e la curva definita dall'evoluzione nel tempo della distanza angolare θ , alla quale ci si riferisce in seguito come al segnale di distanza. Più in particolare, la relazione di fase prevede che ciascun impulso elettrico si estenda temporalmente in un corrispondente intervallo di tempo, durante il quale la derivata del modulo del segnale di distanza è negativa. Nel seguito ci si riferisce a tale relazione di fase come alla relazione di sincronia.

L'applicazione di ciascun impulso elettrico al primo

ed al secondo elettrodo di statore 62, 64 comporta dunque l'applicazione di una corrispondente coppia ("torque") di natura elettrostatica, la quale mantiene in oscillazione l'elemento mobile 60. Infatti, assumendo che l'elemento mobile 60 stia oscillando e si trovi ad una distanza angolare $+\theta_{\max}$, l'applicazione al primo ed al secondo elettrodo di statore 62, 64 di un primo impulso elettrico causa la generazione di una coppia che tende a riportare l'elemento mobile 60 verso la posizione di riposo, con conseguente riduzione della torsione cui sono soggetti il primo ed il secondo elemento deformabile 56, 58. Una volta raggiunta la posizione di riposo, l'applicazione della coppia cessa, ma l'elemento mobile 60, a causa della propria inerzia, oltrepassa la posizione di riposo, fino a raggiungere una distanza angolare $-\theta_{\max}$, in corrispondenza della quale si verifica l'applicazione al primo ed al secondo elettrodo di statore 62, 64 di un secondo impulso elettrico. Si genera quindi una ulteriore coppia, la quale tende a riportare l'elemento mobile 60 verso la posizione di riposo, e così di seguito. Gli impulsi elettrici sono dunque distribuiti nel tempo in maniera tale da mantenere in oscillazione l'elemento mobile 60 attorno all'asse O.

In maggior dettaglio, è possibile verificare che, assumendo che l'elemento mobile 60 sia in risonanza, e cioè che la frequenza meccanica di oscillazione f_0 sia pari alla

frequenza meccanica di risonanza f_{RIS} dell'elemento mobile 60, il circuito elettronico di controllo 70 è in grado di inseguire eventuali variazioni della frequenza meccanica di risonanza f_{RIS} , cioè è in grado di pilotare l'elemento mobile 60 in modo tale per cui esso oscilla con una frequenza meccanica di oscillazione sostanzialmente pari alla frequenza meccanica di risonanza. In altri termini, il circuito elettronico di controllo 70 opera in maniera tale per cui la frequenza elettrica del segnale di pilotaggio V_p è sostanzialmente pari $2 \cdot f_{\text{RIS}}$.

In pratica, il circuito elettronico di controllo 70 forma un anello di controllo chiuso. Inoltre, ad esclusione del condensatore variabile C_{var} e del primo e del secondo resistore variabile 56, 58, i rimanenti elementi del circuito elettronico di controllo 70 possono essere formati, ad esempio, in un ulteriore corpo di supporto fisso (non mostrato) di materiale semiconduttore. Sono comunque possibili, ad esempio, forme di realizzazione in cui il secondo amplificatore 84 è formato nel corpo di supporto fisso 40, oppure in cui, ancora a titolo esemplificativo, il circuito elettronico di controllo 70 è formato interamente all'interno del corpo di supporto fisso 40. Indipendentemente dai dettagli realizzativi, il funzionamento del circuito elettronico di controllo 70 può essere descritto, in modo semplificato, adottando

un'evoluzione temporale a passi discreti, come è prassi comune nell'analisi dei sistemi retroazionati, e nell'ipotesi di "rompere" l'anello di controllo chiuso in corrispondenza dell'uscita del comparatore 82.

In dettaglio, qualora si verifichi una piccola variazione della frequenza meccanica di risonanza f_{RIS} , ad esempio a causa di una variazione di temperatura, l'elemento mobile 60 tende a continuare ad oscillare con una frequenza meccanica di oscillazione pari a metà della frequenza elettrica del segnale di pilotaggio V_p . Tuttavia, dal momento che il moto dell'elemento mobile 60 è analogo al moto di un sistema massa-molla, il quale a sua volta è descrivibile mediante un'equazione differenziale del secondo ordine, tale variazione causa uno sfasamento tra il segnale di distanza ed il segnale di pilotaggio V_p . Pertanto, si verifica una modifica della summenzionata relazione di sincronia; i fronti di salita degli impulsi elettrici del segnale di pilotaggio V_p tendono a risultare in anticipo, oppure in ritardo, rispetto al summenzionato segnale di distanza.

In assenza dell'anello di controllo chiuso, il comparatore 82 tenderebbe a commutare la tensione sulla propria uscita in istanti di tempo differenti rispetto agli istanti in cui si verificano i fronti di salita/discesa del segnale di pilotaggio V_p . Al contrario, nel caso del

circuito elettronico di controllo 70, l'anello di controllo chiuso interviene, sia pur con un ritardo che dipende dalla propria banda. Pertanto, esaurito un transitorio, il segnale di pilotaggio V_p si sincronizza nuovamente con l'uscita del comparatore 82, in modo tale per cui il segnale di pilotaggio V_p ed il segnale di distanza rispettano nuovamente la summenzionata relazione di sincronia. In pratica, si verifica che, al fine di garantire il rispetto, da parte del segnale di pilotaggio V_p e del segnale di distanza, della relazione di sincronia, la frequenza elettrica del segnale di pilotaggio V_p varia, in modo da consentire l'inseguimento della frequenza meccanica di risonanza f_{RIS} . In tal modo, grazie al circuito elettronico di controllo 70, l'elemento mobile 60 continua ad oscillare con una frequenza sostanzialmente pari alla frequenza meccanica di risonanza.

Sono in ogni caso possibili forme di realizzazione differenti, in cui il segnale di pilotaggio V_p viene generato ancora in funzione del segnale di ingresso V_{RES} , ma in modo differente rispetto a quanto descritto. Ad esempio, il segnale di pilotaggio V_p può essere generato mediante impiego di un'unità di elaborazione digitale, previa generazione di un segnale digitale proporzionale al segnale di ingresso V_{RES} , e successiva elaborazione di tale segnale digitale da parte dell'unità di elaborazione digitale.

Inoltre, il segnale di pilotaggio V_p può essere tale da pilotare l'oscillazione dell'elemento mobile 60 ad una frequenza meccanica diversa dalla frequenza meccanica di risonanza f_{RIS} , oppure può essere tale da consentire di accelerare o frenare il modo rotatorio dell'elemento mobile 60 attorno all'asse O.

I vantaggi che il presente dispositivo MEMS consente di ottenere emergono chiaramente dalla precedente descrizione. In particolare, il presente dispositivo MEMS consente di rilevare la posizione dell'elemento mobile sulla base di un segnale elettrico che è funzione della deformazione del primo e del secondo elemento deformabile ed è ottenuto facendo fluire una corrente attraverso gli stessi primo e secondo elemento deformabile, senza la necessità di predisporre ulteriori elementi elettronici sul corpo mobile 54. Inoltre, tale segnale elettrico può essere utilmente impiegato, ad esempio, per implementare un anello di controllo chiuso della posizione dell'elemento mobile 60, come descritto in precedenza; in tal modo, non è necessario disaccoppiare la fase di rilevazione della posizione dell'elemento mobile 60 dalla fase di pilotaggio del medesimo, cioè dalla fase di azionamento del motore elettrostatico.

Il presente dispositivo MEMS consente inoltre di pilotare l'elemento mobile 60 senza necessità di ricorrere

ad una complessa unità di elaborazione, né a convertitori ADC/DAC. Infatti, il presente dispositivo MEMS si avvale di un sensore resistivo, formato dal generatore di corrente, il quale consente di generare il summenzionato segnale di ingresso V_{RES} . Il condensatore di ingresso 72, il primo amplificatore 76, il filtro passa basso 78, il traslatore di fase 80, il comparatore 82 ed il secondo amplificatore 84 formano circuito elettrico di azionamento, il quale genera il segnale di pilotaggio V_p , sulla base del segnale di ingresso V_{RES} .

Risulta infine chiaro che rispetto 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.

A titolo puramente esemplificativo, le dita possono essere assenti; in altre parole, è possibile che uno o più tra l'elemento mobile 60 e la prima e la seconda sottoregione di statore 48, 50 non formino alcun elemento allungato.

Inoltre, sono possibili forme di realizzazione in cui il segnale di ingresso V_{RES} , presente sul nodo di ingresso IN, è proporzionale solo ad una tra le resistenze del primo e del secondo resistore variabile R_{56} , R_{58} .

Sono inoltre possibili forme di realizzazione in cui

la prima e la seconda sottoregione di statore 48, 50 formano un'unica regione di statore monolitica, e dunque non sono fisicamente separate tra loro. In tal caso, uno tra il primo ed il secondo elettrodo di statore può essere assente. E' inoltre possibile che una tra la prima e la seconda sottoregione di statore sia assente.

Infine, è possibile che almeno uno tra il primo ed il secondo elemento deformabile sia formato da un materiale diverso da un semiconduttore, quale ad esempio un metallo.

RIVENDICAZIONI

1. Dispositivo MEMS comprendente:

- un corpo di supporto fisso (40);
- un primo e un secondo elemento deformabile (56,58)

vincolati al corpo di supporto fisso;

- un elemento mobile (60) interposto tra, e collegato a, detti primo e secondo elemento deformabile, l'elemento mobile essendo ruotabile rispetto al corpo di supporto fisso, con conseguente deformazione del primo e del secondo elemento deformabile; e

- un generatore (74) configurato per far fluire una corrente (I_R) attraverso almeno uno tra il primo ed il secondo elemento deformabile, in modo da generare un segnale elettrico di posizione (V_{RES}) proporzionale ad almeno una tra una prima resistenza, del primo elemento deformabile, ed una seconda resistenza, del secondo elemento deformabile, dette prima e seconda resistenza essendo rispettivamente proporzionali alle deformazioni del primo e del secondo elemento deformabile ed essendo indicative della posizione angolare dell'elemento mobile, detto segnale elettrico di posizione essendo elaborabile per determinare la posizione angolare dell'elemento mobile.

2. Dispositivo MEMS secondo la rivendicazione 1, in cui il corpo di supporto fisso (40) forma una prima ed una seconda sottoregione di rotore (44,46), alle quali il primo

ed il secondo elemento deformabile (56,58) sono rispettivamente vincolati, in maniera tale per cui l'elemento mobile (60) ed il primo ed il secondo elemento deformabile (56,58) sono elettricamente interposti tra la prima e la seconda sottoregione di rotore; ed in cui il generatore (74) è configurato per far fluire la corrente (I_R) attraverso il primo elemento deformabile (56), il secondo elemento deformabile (58) e l'elemento mobile (60), in modo che il segnale elettrico di posizione (V_{RES}) sia proporzionale alla somma di dette prima e seconda resistenza.

3. Dispositivo MEMS secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui la prima e la seconda sottoregione di rotore (44,46), l'elemento mobile (60) ed il primo ed il secondo elemento deformabile (56,58) sono formati di materiale semiconduttore e formano un unico pezzo.

4. Dispositivo MEMS secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre un circuito elettrico di azionamento (72,76,78,80,82,84) configurato per esercitare una coppia sull'elemento mobile (60), in funzione del segnale elettrico di posizione (V_{RES}).

5. Dispositivo MEMS secondo la rivendicazione 4, in cui il corpo di supporto fisso (40) forma inoltre una prima sottoregione di statore (48), ed in cui il circuito elettrico di azionamento (72,76,78,80,82,84) è configurato

per generare un segnale elettrico di pilotaggio (V_p) sulla base del segnale elettrico di posizione (V_{RES}) e per applicare alla prima sottoregione di statore detto segnale elettrico di pilotaggio.

6. Dispositivo MEMS secondo la rivendicazione 5, in cui il corpo di supporto fisso (40) forma inoltre una seconda sottoregione di statore (50), ed in cui il circuito elettrico di azionamento (72,76,78,80,82,84) è inoltre configurato per applicare il segnale elettrico di pilotaggio (V_p) anche alla seconda sottoregione di statore.

7. Dispositivo MEMS secondo la rivendicazione 6, in cui ciascuno tra detti primo e secondo elemento deformabile (56,58) ha una prima, una seconda ed una terza dimensione, misurate rispettivamente lungo una prima, una seconda ed una terza direzione tra loro ortogonali (x,y,z), detta prima dimensione essendo superiore a dette seconda e terza dimensione, dette prima e seconda sottoregione di statore (48,50) essendo disposte in maniera tale per cui, quando ricevono il segnale elettrico di pilotaggio (V_p), l'elemento mobile (60) ruota attorno ad un asse di rotazione (O) parallelo alla prima direzione.

8. Dispositivo MEMS secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 5 a 7, in cui il circuito elettrico di azionamento (72,76,78,80,82,84) comprende:

- un circuito traslatore di fase (72,76,78,80)

configurato per generare un segnale elettrico traslato (V_{90}), il quale è traslato di 90° rispetto al segnale elettrico di posizione (V_{RES}); e

- un circuito comparatore (82) configurato per confrontare il segnale elettrico traslato con una soglia elettrica (V_{ref}) e per generare, ad ogni attraversamento della soglia elettrica da parte del segnale elettrico traslato, un corrispondente fronte del segnale elettrico di pilotaggio (V_p).

9. Sistema MEMS proiettivo comprendente un dispositivo MEMS (30) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti ed un elemento riflettente (65) atto a riflettere radiazione elettromagnetica e vincolato all'elemento mobile (60).

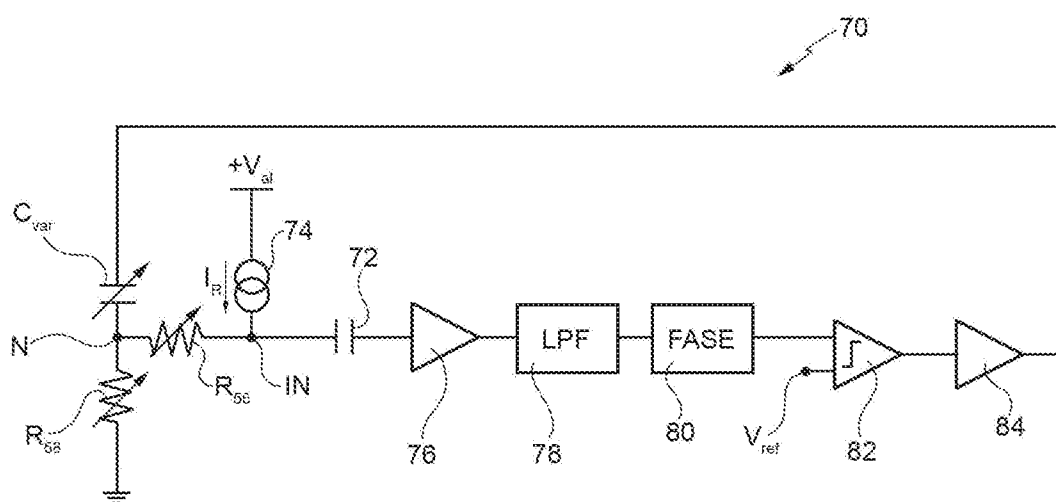
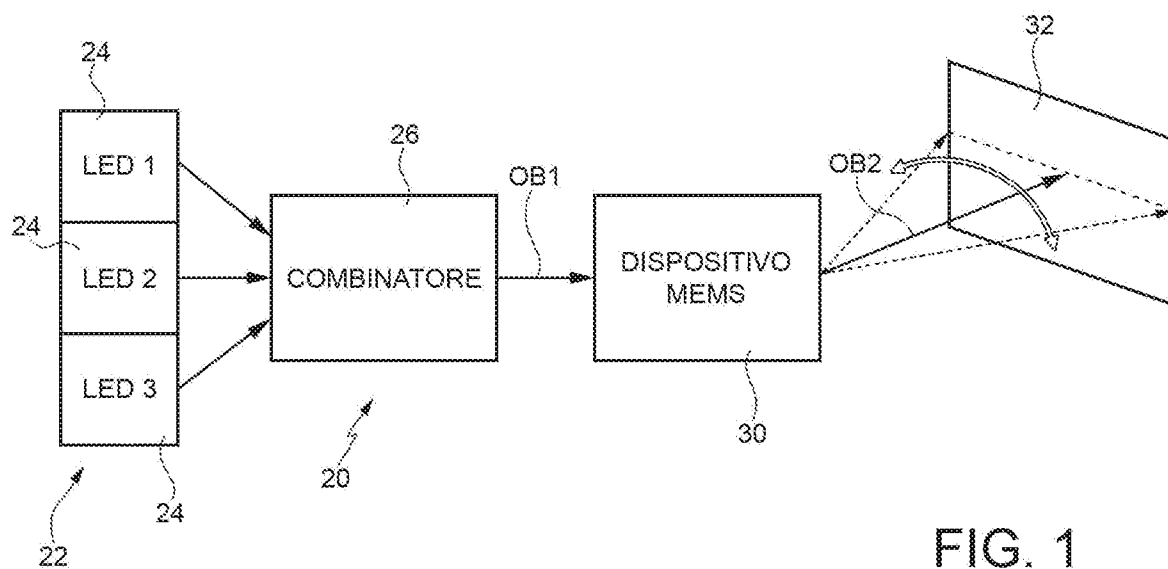
10. Metodo di generazione di un segnale elettrico indicativo della posizione angolare di un elemento mobile (60) di un dispositivo MEMS (30), detto dispositivo MEMS comprendendo inoltre un corpo di supporto fisso (40) ed un primo ed un secondo elemento deformabile (56,58) vincolati al corpo di supporto fisso, l'elemento mobile (60) essendo interposto tra, e collegato a, detti primo e secondo elemento deformabile, ed essendo ruotabile rispetto al corpo di supporto fisso, con conseguente deformazione del primo e del secondo elemento deformabile, detto metodo comprendendo la fase di:

- far fluire una corrente (I_R) attraverso almeno uno tra il primo ed il secondo elemento deformabile, in maniera tale da generare detto segnale elettrico (V_{RES}) in modo che sia proporzionale ad almeno una tra una prima resistenza, del primo elemento deformabile, ed una seconda resistenza, del secondo elemento deformabile, dette prima e seconda resistenza essendo rispettivamente proporzionali alle deformazioni del primo e del secondo elemento deformabile.

11. Metodo secondo la rivendicazione 10, in cui il corpo di supporto fisso (40) forma una prima ed una seconda sottoregione di rotore (44,46), alle quali il primo ed il secondo elemento deformabile (56,58) sono rispettivamente vincolati, in maniera tale per cui l'elemento mobile (60) ed il primo ed il secondo elemento deformabile (56,58) sono elettricamente interposti tra la prima e la seconda sottoregione di rotore, ed in cui detta fase di far fluire una corrente (I_R) comprende far fluire la corrente attraverso l'elemento mobile (60) ed il primo ed il secondo elemento deformabile (56,58), in modo che detto segnale elettrico (V_{RES}) sia proporzionale alla somma di dette prima e seconda resistenza.

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

Pietro SPALLA



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

Pietro SPALLA
(Iscrizione Albo nr. 1430/B)

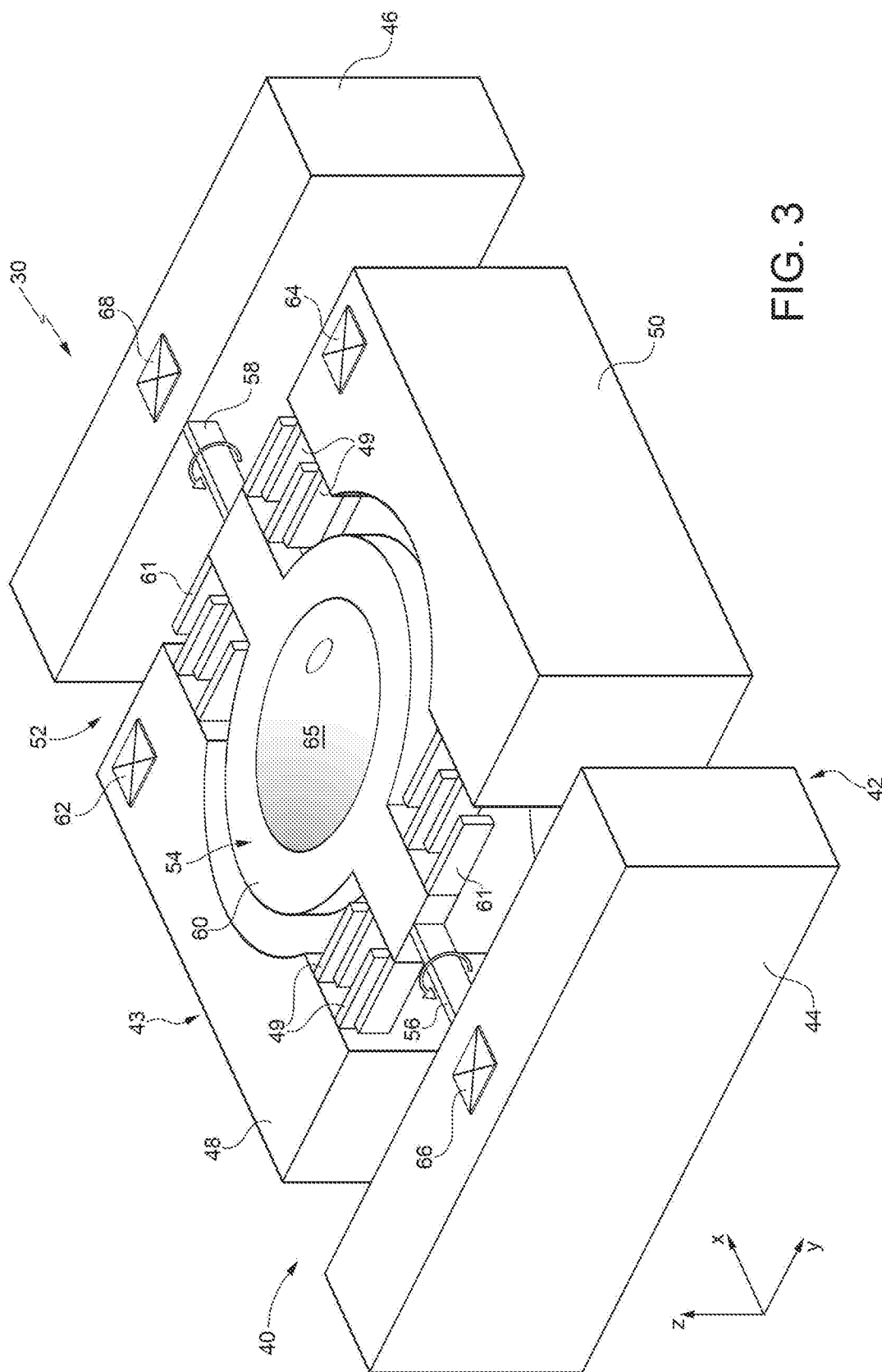


FIG. 3

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

Pietro SPALLA
(Iscrizione Albo nr. 1430/B)

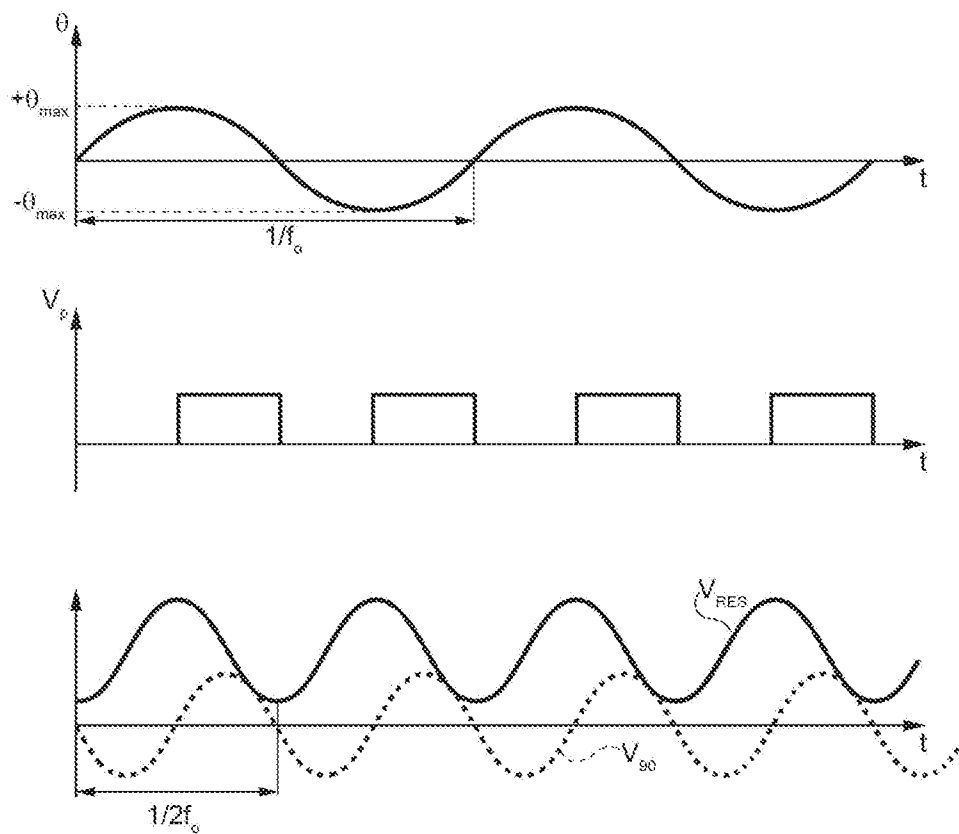


FIG. 5

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

Pietro SPALLA
(Iscrizione Albo nr. 1430/B)