

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102021000023240
Data Deposito	08/09/2021
Data Pubblicazione	08/03/2023

Classifiche IPC

Titolo

ATTUATORE MEMS E RELATIVO PROCESSO DI FABBRICAZIONE

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"ATTUATORE MEMS E RELATIVO PROCESSO DI FABBRICAZIONE"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

5 di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI 2

20864 AGRATE BRIANZA (MB)

Inventori: GIUSTI Domenico, LAZZARI Carla Maria

* * *

10 La presente invenzione è relativa ad un attuatore MEMS
e relativo processo di fabbricazione. In dettaglio, è
relativa ad un attuatore MEMS comprendente una struttura
deformabile che definisce uno spazio interno che si espande
quando un fluido è pompato all'interno di esso, generando
15 una conseguente deformazione della struttura deformabile che
permette di esercitare una forza di attuazione su un corpo
esterno presente sulla struttura deformabile. Inoltre, è
relativa ad un processo di fabbricazione dell'attuatore MEMS
e ad un metodo di controllo del medesimo.

20 Come noto, gli attuatori MEMS ("Micro Electro-
Mechanical Systems") sono dispositivi che convertono energia
da una forma ad un'altra, cioè tra variabili fisiche
differenti fra loro. Esempi di attuatori MEMS sono valvole,
interruttori ("switches"), pompe, micro-motori di tipo
25 lineare o rotativo, e permettono ad esempio di convertire

una grandezza elettrica (es., tensione) in una grandezza meccanica (es., uno spostamento, un allungamento o una torsione).

In particolare, sono noti attuatori MEMS (micro-
5 attuatori) di tipo piezoelettrico, che generano spostamenti a seguito di deformazioni ("strain") dei medesimi causate da campi elettrici applicati ad essi.

Tuttavia, i micro-attuatori piezoelettrici noti sono in grado di generare forze ridotte, generalmente comprese fra
10 circa 10 mN e circa 100 mN, che per alcune applicazioni risultano non esser sufficienti.

Scopo della presente invenzione è fornire un attuatore MEMS, un metodo di controllo e un processo di fabbricazione dell'attuatore MEMS che superino gli inconvenienti dell'arte
15 nota.

Secondo la presente invenzione vengono realizzati un attuatore MEMS, un metodo di controllo e un processo di fabbricazione dell'attuatore MEMS, come definiti nelle rivendicazioni annesse.

20 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 è una sezione prospettica di un
25 attuatore MEMS, secondo una forma di realizzazione;

- la figura 2 è una sezione prospettica di una struttura deformabile dell'attuatore MEMS di figura 1, secondo una forma di realizzazione;

5 - la figura 3 è una vista in sezione laterale della struttura deformabile di figura 2;

- la figura 4 è una vista in sezione laterale dell'attuatore MEMS di figura 1;

- le figure 5A-5C sono grafici che mostrano segnali di controllo di elementi dell'attuatore MEMS di figura 1;

10 - la figura 6 è un grafico che mostra segnali di spostamento di detti elementi dell'attuatore MEMS di figura 1;

- le figure 7A-7I sono viste in sezione laterali che illustrano fasi di un processo di fabbricazione dell'attuatore MEMS di figura 1, secondo una forma di
15 realizzazione;

- le figure 8 e 9 sono viste in sezione laterale dell'attuatore MEMS, secondo diverse forma di realizzazione;
e

20 - la figura 10 è una sezione prospettica della struttura deformabile dell'attuatore MEMS, secondo una diversa forma di realizzazione.

Elementi comuni alle diverse forme di realizzazione della presente invenzione, descritte nel seguito, sono
25 indicati con gli stessi numeri di riferimento.

La figura 1 mostra, secondo una forma di realizzazione e in un sistema di riferimento cartesiano triassiale definito da assi X, Y e Z, un attuatore (o micro-attuatore) 10 realizzato in tecnologia MEMS e per questo nel seguito anche
5 chiamato attuatore MEMS 10.

L'attuatore MEMS 10 comprende: un corpo semiconduttore 12 di materiale semiconduttore (es, silicio), avente una prima superficie 12a e una seconda superficie 12b opposte fra loro lungo l'asse Z; e una struttura deformabile 20 di
10 materiale semiconduttore (es, silicio) formata nel corpo semiconduttore 12, ad esempio in corrispondenza della prima superficie 12a.

Al fine di illustrarne anche la struttura interna, l'attuatore MEMS 10 viene esemplificativamente mostrato in
15 figura 1 e nelle figure seguenti in sezione lungo un piano XZ, definito dagli assi X e Z, passante per un asse di mezzeria (meglio discusso nel seguito) della struttura deformabile 20.

La struttura deformabile 20 è pneumaticamente
20 controllabile in modo da deformarsi elasticamente lungo un asse di deformazione 14 trasversale alla prima superficie 12a (in dettaglio, nella presente forma di realizzazione è ortogonale alla prima superficie 12a), esercitando di conseguenza una forza di attuazione lungo l'asse di
25 deformazione 14. In altre parole, la struttura deformabile

20 realizza un elemento a volume variabile, quale un soffiETTO pneumatico.

In dettaglio, come meglio mostrato nelle figure 2 e 3, la struttura deformabile 20 si estende in una cavità di alloggiamento 22 del corpo semiconduttore 12, affacciata alla superficie superiore 12a. In particolare, la struttura deformabile 20 è monolitica con il corpo semiconduttore 12. In maggior dettaglio, la struttura deformabile 20 è accoppiata fisicamente ad una superficie inferiore 22a della cavità di alloggiamento 22 (opposta alla prima superficie 12a del corpo semiconduttore 12 rispetto alla cavità di alloggiamento 22), e si estende a distanza da superfici laterali 22b della cavità di alloggiamento 22 (che uniscono la superficie inferiore 22a alla prima superficie 12a del corpo semiconduttore 12).

La struttura deformabile 20 è una struttura di materiale semiconduttore che definisce e delimita esternamente uno spazio interno 24 della struttura deformabile 20, e che presenta un'apertura 21 attraverso la quale lo spazio interno 24 può comunicare pneumaticamente con un ambiente esterno all'attuatore MEMS 10. In altre parole, la struttura deformabile 20 ha sezione anulare in un piano XY (definito dagli assi X e Y) e delimita lo spazio interno 26 radialmente rispetto all'asse Z. In particolare, lo spazio interno 24 è in connessione di fluido con l'ambiente esterno tramite un

canale fluidico 25 che si estende nel corpo semiconduttore 12 definendo un percorso fluidico. Il canale fluidico 25 ha una prima estremità 25' che si estende attraverso la superficie inferiore 22a della cavità di alloggiamento 22 in
5 continuità con l'apertura 21, è affacciata allo spazio interno 24 e ha una seconda estremità 25'' affacciata all'ambiente esterno.

In particolare, la struttura deformabile 20 è ripiegata su sé stessa lungo l'asse Z e definisce uno o più sottospazi
10 interni 26 (es., camere) della struttura deformabile 20. Nel caso di una pluralità di sottospazi interni 26, essi sono sovrapposti fra loro lungo l'asse Z, sono in comunicazione di fluido fra loro attraverso uno o più fori di comunicazione fluidica 27 (ciascun foro di comunicazione fluidica 27
15 collegando due sottospazi interni 26 contigui fra loro), e assieme formano lo spazio interno 24. Ad esempio, l'uno o più fori di comunicazione fluidica 27 sono allineati, lungo l'asse Z, fra loro e con la prima estremità 25' del canale fluidico 25.

20 A scopo puramente esemplificativo, la figura 2 mostra un primo sottospazio interno 26' e un secondo sottospazio interno 26'' connessi tramite un foro di comunicazione fluidica 27, sebbene il numero di sottospazi interni 26 possa esser analogamente minore (cioè un solo sottospazio interno
25 26) o maggiore (cioè tre o più sottospazi interni 26) e il

numero di fori di comunicazione fluidica 27 possa variare conseguentemente.

La struttura deformabile 20 presenta inoltre un asse di mezzeria 15 parallelo all'asse Z (in dettaglio, un asse
5 ortogonale al piano XY passante per un centro, nel piano XY, della struttura deformabile 20), esemplificativamente mostrato coincidente con l'asse di deformazione 14.

Nella forma di realizzazione di figura 2, la struttura deformabile 20 è simmetrica rispetto all'asse di mezzeria
10 15; il foro di comunicazione fluidica 27 e l'apertura 21 sono allineati fra loro e concentrici lungo l'asse di mezzeria 15.

A scopo esemplificativo, la struttura deformabile 20 presenta forma circolare parallelamente al piano XY, sebbene
15 diverse forme poligonali possano esser analogamente considerate come meglio descritto nel seguito.

La figura 3 mostra la struttura deformabile 20 in una condizione di riposo, cioè in una condizione in cui non viene pompato fluido (nel seguito si considera
20 esemplificativamente aria) nello spazio interno 24 e dunque la struttura deformabile 20 non è deformata da una forza di espansione dovuta a tale pompaggio, come meglio discusso nel seguito. Nella condizione di riposo, la struttura deformabile 20 è in una posizione di riposo.

25 La struttura deformabile 20 presenta forma anulare

parallelamente al piano XY e presenta, in sezione lungo un piano XZ definito dagli assi X e Z (analogamente, lungo un piano piano YZ definito dagli assi Y e Z), una pluralità di pieghe che definiscono il primo e il secondo sottospazio
5 interno 26' e 26".

In dettaglio, il primo e il secondo sottospazio interno 26' e 26" sono rispettive cavità che si estendono nella struttura deformabile 20, e presentano estensione principale parallelamente al piano XY. Ad esempio, ciascun sottospazio
10 interno 26' e 26" presenta una prima dimensione massima D_1 lungo l'asse X o Y (misurata fra prime superfici interne 23b' della struttura deformabile 20 opposte fra loro lungo l'asse X o Y ed affacciate al rispettivo sottospazio interno 26', 26") e una seconda dimensione massima D_2 lungo l'asse Z
15 (misurata fra seconde superfici interne 23b'''' della struttura deformabile 20 opposte fra loro lungo l'asse Z ed affacciate al rispettivo sottospazio interno 26', 26") minore della prima dimensione massima D_1 . Ad esempio, un rapporto fra la seconda dimensione massima D_2 e la prima
20 dimensione massima D_1 è minore di circa 6%.

In particolare, la struttura deformabile 20 comprende: una prima porzione di raccordo 23a che unisce la struttura deformabile 20 al corpo semiconduttore 12, in corrispondenza della superficie inferiore 22a della cavità di alloggiamento
25 22, e che definisce l'apertura 21; una prima porzione

deformante 23b che è unita alla prima porzione di raccordo 23a da parte opposta di quest'ultima rispetto alla superficie inferiore 22a della cavità di alloggiamento 22, e che definisce il primo sottospazio interno 26'; una seconda
5 porzione di raccordo 23c che è unita alla prima porzione deformante 23b da parte opposta di quest'ultima rispetto alla prima porzione di raccordo 23a, e che definisce il foro di comunicazione fluidica 27 che collega il primo sottospazio interno 26' al secondo sottospazio interno 26"; e una seconda
10 porzione deformante 23d che è unita alla seconda porzione di raccordo 23c da parte opposta di quest'ultima rispetto alla prima porzione deformante 23b, e che definisce il secondo sottospazio interno 26". Le porzioni deformanti 23b e 23d si estendono a distanza, lungo l'asse Z, sia fra loro che
15 rispetto alla superficie inferiore 22a della cavità di alloggiamento 22, a causa delle rispettive porzioni di raccordo 23a e 23c. Inoltre, il canale fluidico 25 si estende in prosecuzione con l'apertura 21, affacciandosi così al primo sottospazio interno 26'.

20 In maggior dettaglio, ciascuna porzione di raccordo 23a, 23c presenta, parallelamente al piano XY, forma anulare definita da una prima dimensione massima interna $D_{i,1}$ (misurata parallelamente al piano XY, dunque ortogonalmente all'asse Z, e ad esempio lungo l'asse X, fra superfici
25 interne 23a' della porzione di raccordo 23a, 23c che sono

opposte fra loro lungo l'asse X e che si affacciano al canale
 fluidico 25 e, rispettivamente, al foro di comunicazione
 fluidica 27) e da una prima dimensione massima esterna $D_{e,1}$
 (misurata parallelamente al piano XY, ad esempio lungo l'asse
 5 X, fra superfici esterne 23a'' della porzione di raccordo
 23a, 23c che sono opposte fra loro lungo l'asse X e che si
 affacciano alla cavità di alloggiamento 22) maggiore della
 prima dimensione massima interna $D_{i,1}$. Inoltre, ciascuna
 porzione deformante 23b, 23d presenta, in corrispondenza del
 10 rispettivo sottospazio interno 26', 26'' e parallelamente al
 piano XY, forma anulare definita da una seconda dimensione
 massima interna $D_{i,2}$ (misurata parallelamente al piano XY, ad
 esempio lungo l'asse X, fra le prime superfici interne 23b'
 della porzione deformante 23b, 23d che sono opposte fra loro
 15 lungo l'asse X e che si affacciano al rispettivo sottospazio
 interno 26', 26'') e da una seconda dimensione massima esterna
 $D_{e,2}$ (misurata parallelamente al piano XY, ad esempio lungo
 l'asse X, fra prime superfici esterne 23b'' della porzione
 deformante 23b, 23d che sono opposte fra loro lungo l'asse
 20 X e che si affacciano alla cavità di alloggiamento 22)
 maggiore della seconda dimensione massima interna $D_{i,2}$. Qui,
 la seconda dimensione massima interna $D_{i,2}$ è pari alla
 summenzionata prima dimensione massima D_1 . Inoltre, valgono
 le relazioni $D_{i,1} < D_{i,2}$ e $D_{e,1} < D_{e,2}$, e in maggior dettaglio vale
 25 la relazione $D_{i,1} < D_{e,1} < D_{i,2} < D_{e,2}$. Inoltre, ciascuna porzione

deformante 23b, 23d presenta, parallelamente all'asse Z, una terza dimensione massima esterna $D_{e,3}$ (misurata lungo l'asse Z, fra seconde superfici esterne 23''' della porzione deformante 23b, 23d che sono opposte fra loro lungo l'asse Z e che si affacciano alla cavità di alloggiamento 22) che è maggiore della seconda dimensione massima D_2 e minore della seconda dimensione massima esterna $D_{e,2}$. Ad esempio, un rapporto fra la terza dimensione massima esterna $D_{e,3}$ e la seconda dimensione massima esterna $D_{e,2}$ è minore di circa 6%.

In figura 3, per semplicità sono state indicate le dimensioni massime interne $D_{i,1}$, $D_{i,2}$ e le dimensioni massime esterne $D_{e,1}$, $D_{e,2}$ solo per la prima porzione di raccordo 23a e per la prima porzione deformante 23b, sebbene essi siano chiaramente e analogamente applicabili anche alla seconda porzione di raccordo 23c e alla seconda porzione deformante 23d.

Inoltre, la prima porzione di raccordo 23a e la seconda porzione di raccordo 23c sono concentriche fra loro e simmetriche rispetto ad un asse di simmetria 16 che, nella forma di realizzazione di figura 2 e 3, coincide con l'asse di mezzzeria 15.

A scopo puramente esemplificativo, la prima dimensione massima interna $D_{i,1}$ è compresa fra circa 5 μm e circa 100 μm , la prima dimensione massima esterna $D_{e,1}$ è compresa fra circa 50 μm e circa 500 μm , la seconda dimensione massima

interna $D_{i,2}$ è compresa fra circa 200 μm e circa 1000 μm , la seconda dimensione massima esterna $D_{e,2}$ è compresa fra circa 300 μm e circa 2000 μm .

Ad esempio, nella presente forma di realizzazione in cui la struttura deformabile 20 ha forma circolare parallelamente al piano XY (cioè dette sezioni anulari hanno forma circolare), le dimensioni massime interne $D_{i,1}$, $D_{i,2}$ coincidono con un diametro minore delle sezioni anulari delle porzioni di raccordo 23a, 23c e, rispettivamente, delle porzioni deformanti 23b, 23d, mentre le dimensioni massime esterne $D_{e,1}$, $D_{e,2}$ coincidono con un diametro maggiore delle sezioni anulari delle porzioni di raccordo 23a, 23c e, rispettivamente, delle porzioni deformanti 23b, 23d.

Inoltre, la struttura deformabile 20 presenta una superficie superiore 23e (qui una superficie superiore della seconda porzione deformante 23d, estendentesi da parte opposta della seconda porzione deformante 23d rispetto alla prima porzione deformante 23b) che, nella posizione di riposo della struttura deformabile 20, è allineata lungo l'asse Z con la prima superficie 12a del corpo semiconduttore 12.

In uso, la struttura deformabile 20 viene utilizzata come attuatore. In particolare, viene inserita (pompata attivamente) aria attraverso il canale fluidico 25 nello spazio interno 24, come meglio descritto nel seguito. Questo pompaggio d'aria genera detta forza di espansione (non

mostrata) operante, radialmente rispetto allo spazio interno 24 e verso l'esterno, sulla struttura deformabile 20 (in dettaglio, sulle superfici interne della struttura deformabile 20 che si affacciano allo spazio interno 24). La
5 forza di espansione causa una deformazione della struttura deformabile 20 lungo l'asse di deformazione 14, e dunque una crescita del volume dello spazio interno 24, che porta la superficie superiore 23e della struttura deformabile 20 ad allontanarsi dal corpo semiconduttore 12.

10 In altre parole, la struttura deformabile 20 presenta una dimensione massima di allungamento D_{all} lungo l'asse Z (cioè una massima lunghezza lungo l'asse Z, ad esempio misurata fra la superficie superiore 23e della struttura deformabile 20 e la superficie inferiore 22a della cavità di
15 alloggiamento 22); quando la struttura deformabile 20 è nella posizione di riposo (es., figura 3), lo spazio interno 24 presenta un primo volume e la dimensione massima di allungamento D_{all} ha un primo valore; quando la struttura deformabile 20 è sollecitata e deformata a causa del
20 pompaggio d'aria nello spazio interno 24 (es., figura 2), la struttura deformabile 20 è in una propria posizione di allungamento (diversa dalla posizione di riposo), lo spazio interno 24 presenta un secondo volume maggiore del primo volume e la dimensione massima di allungamento D_{all} ha un
25 secondo valore maggiore del primo valore.

In dettaglio, data la forma della struttura deformabile 20 lungo l'asse Z, tale deformazione avviene principalmente lungo l'asse di deformazione 14 verso l'esterno della cavità di alloggiamento 22 (cioè in direzione opposta rispetto alla
5 superficie inferiore 22a). Inoltre, in modo pressoché trascurabile, la struttura deformabile 20 si deforma anche parallelamente al piano XY, in dettaglio subendo contrazione lungo gli assi X e Y rispetto a quando essa è in condizione di riposo.

10 Come conseguenza dell'allungamento della struttura deformabile 20 lungo l'asse Z al crescere della pressione nello spazio interno 24, la struttura deformabile 20 esercita, in corrispondenza della superficie superiore 23e, detta forza di attuazione (indicata in figura 2 con il
15 riferimento F_{att}) lungo l'asse di deformazione 14, verso l'esterno della cavità di alloggiamento 22. Di conseguenza, un corpo esterno posto sulla superficie superiore 23e subirà l'effetto di tale forza di attuazione F_{att} e verrà alzato (cioè allontanato lungo l'asse Z rispetto al corpo
20 semiconduttore 12).

Con riferimento alla figura 1 e secondo una forma di realizzazione, l'attuatore MEMS 10 comprende inoltre un gruppo di pompaggio 30 che si estende nel corpo
semiconduttore 12 (ad esempio in corrispondenza della prima
25 superficie 12a) lungo il percorso fluidico definito dal

canale fluidico 25, è pneumaticamente accoppiato alla struttura deformabile 20 ed è controllabile per pompare aria nella struttura deformabile 20 in modo da causarne la deformazione.

5 In dettaglio, il gruppo di pompaggio 30 comprende una prima valvola 32, una micro-pompa 34 e una seconda valvola 36, disposte in successione fra loro e in collegamento pneumatico sia fra loro che con la struttura deformabile 20.

10 In particolare, la micro-pompa 34 e la prima e la seconda valvola 32 e 36 si estendono lungo il percorso fluidico e permettono il pompaggio d'aria dall'ambiente esterno verso lo spazio interno 24. Lungo questo percorso fluidico, la micro-pompa 34 è interposta fra la prima e la seconda valvola 32 e 36, e la seconda valvola 36 è interposta
15 fra la micro-pompa 34 e la struttura deformabile 20.

La prima valvola 32, la micro-pompa 34 e la seconda valvola 36 sono realizzate in tecnologia MEMS e sono di tipo noto. In particolare, sono di tipo piezoelettrico, e ad esempio sfruttano "thin films" piezoelettrici.

20 In dettaglio, come meglio mostrato nella figura 4, il corpo semiconduttore 12 comprende un primo substrato 40 e un secondo substrato 41, entrambi di materiale semiconduttore quale silicio, accoppiati fra loro tramite uno strato di fissaggio 42 (es., "blanker wafer" oppure strato di materiale
25 polimerico, per permettere un fissaggio permanente). In

particolare, il primo substrato 40 presenta una prima superficie 40a e una seconda superficie 40b opposte fra loro lungo l'asse Z, il secondo substrato 41 presenta una prima superficie 41a e una seconda superficie 41b opposte fra loro lungo l'asse Z, e lo strato di fissaggio 42 si estende a contatto con le seconde superfici 40b e 41b dei substrati 40 e 41, che dunque sono affacciate fra loro attraverso lo strato di fissaggio 42.

Inoltre, il primo substrato 40 presenta una regione che è lateralmente sfalsata rispetto al secondo substrato 41 (cioè non è verticalmente sovrapposta, lungo l'asse Z, al secondo substrato 41), in modo da non esser affacciata al secondo substrato 41 e da lasciare esposta una prima regione esposta 40b' della seconda superficie 40b del primo substrato 40. La prima superficie 40a del primo substrato 40 forma la prima superficie 12a del corpo semiconduttore 12, mentre la prima superficie 41a del secondo substrato 41 e la prima regione esposta 40b' della seconda superficie 40b del primo substrato 40 formano la seconda superficie 12b del corpo semiconduttore 12.

La prima valvola 32, la micro-pompa 34 e la seconda valvola 36 si estendono in corrispondenza della prima superficie 12a del corpo semiconduttore 12.

In dettaglio, la prima valvola 32, la micro-pompa 34 e la seconda valvola 36 hanno struttura analoga, che viene

esemplificativamente descritta con riferimento alla micro-
pompa 34 sebbene sia analogamente applicabile anche alla
prima e alla seconda valvola 32, 36. In maggior dettaglio,
la micro-pompa 34 comprende una struttura di attuazione 37
5 di tipo piezoelettrico, estendentesi su un corpo di membrana
38 sospeso su una cavità sepolta 39 presente nel corpo
semiconduttore 12, in corrispondenza della prima superficie
12a. La struttura di attuazione 37 comprende un primo
elettrodo 37a sulla prima superficie 12a del corpo
10 semiconduttore 12 (es., a contatto con essa), uno strato
piezoelettrico 37b sovrapposto al primo elettrodo 37a e un
secondo elettrodo 37c sovrapposto allo strato piezoelettrico
37b (cioè estendentesi da parte opposta di quest'ultimo
rispetto al primo elettrodo 37a).

15 In uso, gli elettrodi 37a e 37c sono posti a rispettive
tensioni in modo da polarizzare lo strato piezoelettrico 37b
interposto fra essi che, per effetto piezoelettrico inverso,
si deforma verso la cavità sepolta 39 sottostante. Poiché la
struttura di attuazione 37 è solidale al corpo di membrana
20 38 e forma con esso una membrana 35, la deformazione dello
strato piezoelettrico 37b causa una deformazione dell'intera
membrana 35 verso la cavità sepolta 39.

Le cavità sepolte 39 della prima valvola 32, della
micro-pompa 34 e della seconda valvola 36 sono in
25 comunicazione fluidica tra loro e formano parte del canale

fluidico 25.

Di conseguenza, in uso, la prima e la seconda valvola 32, 36 sfruttano questa deformazione della membrana 35 per occludere (in dettaglio, ostruire completamente) il canale fluidico 25 in corrispondenza della rispettiva cavità sepolta 39. Ciò impedisce la comunicazione fluidica e pneumatica nel canale fluidico 25 fra l'ingresso e l'uscita della valvola 32, 36 considerata, e cioè separa il canale fluidico 25 in due zone fra loro pneumaticamente isolate. Invece, la micro-pompa 34 sfrutta questa deformazione della membrana 35, in combinazione con le valvole 32 e 36 come meglio descritto nel seguito, per applicare una pressione all'aria presente fra la prima e la seconda valvola 32, 36, in modo da generare un gradiente di pressione nel canale fluidico 25 che causa lo spostamento dell'aria nello spazio interno 24 della struttura deformabile 20.

In altre parole, ciascuna valvola 32, 36 è operabile in uno stato aperto (posizione aperta della valvola 32, 36, corrispondente ad una condizione di riposo della valvola 32, 36, e cioè di assenza di polarizzazione e dunque di assenza di deformazione del rispettivo strato piezoelettrico 37b) o in uno stato chiuso (posizione chiusa della valvola 32, 36, corrispondente ad una condizione di lavoro della valvola 32, 36, e cioè di polarizzazione e dunque di deformazione del rispettivo strato piezoelettrico 37b); inoltre, la micro-

pompa 34 è operabile in uno stato inattivo (posizione di
risposo della micro-pompa 34, corrispondente ad una
condizione di assenza di polarizzazione e dunque di assenza
di deformazione del rispettivo strato piezoelettrico 37b) o
5 in uno stato attivo (posizione di pompaggio o deflessa della
micro-pompa 34, corrispondente ad una condizione di lavoro
della micro-pompa 34, e cioè di polarizzazione e dunque di
deformazione dello strato piezoelettrico 37b). Ad esempio,
nello stato aperto o inattivo, le membrane 35 delle valvole
10 32 e 36 e della micro-pompa 34 presentano stress compressivi
intrinseci dello strato piezoelettrico 37b che causano una
deformazione delle membrane 35 stesse in direzione opposta
rispetto alle cavità sepolte 39 (cioè verso l'ambiente
esterno); nello stato chiuso o attivo, le membrane 35 delle
15 valvole 32 e 36 e della micro-pompa 34 subiscono stress
tensili degli strati piezoelettrici 37b, causati
dall'effetto piezoelettrico inverso, che si oppongono agli
stress compressivi e generano la deformazione delle membrane
35 verso le cavità sepolte 39 (cioè all'interno di queste
20 ultime).

Il canale fluidico 25 ha la seconda estremità 25''
affacciata alla prima regione esposta 40b', e si estende nel
primo substrato 40 fino a raggiungere lo spazio interno 24
della struttura deformabile 20.

25 In particolare, una prima porzione 25a del canale

fluidico 25 si estende, principalmente parallelamente all'asse Z, dalla prima regione esposta 40b' fino alla cavità sepolta 39 della prima valvola 32, attraversando dunque la maggior parte del primo substrato 40 lungo l'asse Z. Lungo
5 il canale fluidico 25, seguono poi le cavità sepolte 39 della prima valvola 32, della micro-pompa 34 e della seconda valvola 36. Il canale fluidico 25 comprende poi una seconda porzione 25b che si estende, principalmente parallelamente all'asse Z, dalla cavità sepolta 39 della seconda valvola 36
10 fino ad una terza porzione 25c del canale fluidico 25, che presenta direzione di estensione principale parallela all'asse X e che si estende a contatto con parte della seconda superficie 41b del secondo substrato 41 fino a raggiungere l'apertura 21 affacciata allo spazio interno 24.

15 Viene ora descritto un metodo di controllo dell'attuatore MEMS 10, con riferimento alle figure 5 e 6.

In dettaglio, le figure 5A-5C sono grafici che mostrano l'andamento in funzione del tempo di segnali di controllo S_{v1} , S_p , S_{v2} , rispettivamente, della prima valvola 32, della
20 micro-pompa 34 e della seconda valvola 36. Questi segnali di controllo S_{v1} , S_p , S_{v2} sono forniti dall'esterno dell'attuatore MEMS 10 (ad esempio, da un modulo di polarizzazione esterno elettricamente accoppiabile agli elettrodi 37a e 37c della prima valvola 32, della micro-
25 pompa 34 e della seconda valvola 36) e sono ad esempio

segnali di tensione, in dettaglio la differenza di potenziale applicata agli elettrodi 37a e 37c per controllare la prima valvola 32, la micro-pompa 34 o la seconda valvola 36. Ad esempio, ciascuno dei segnali di controllo S_{v1} , S_p , S_{v2} può variare tra un rispettivo primo valore (indicativo, rispettivamente, dello stato aperto della prima valvola 32, dello stato inattivo della micro-pompa 34 e dello stato aperto della seconda valvola 36 e ad esempio pari a circa 0 V) e un rispettivo secondo valore (indicativo, rispettivamente, dello stato chiuso della prima valvola 32, dello stato attivo della micro-pompa 34 e dello stato chiuso della seconda valvola 36 e ad esempio pari a circa 28-30 V).

Inoltre, la figura 6 è un grafico che mostra l'andamento in funzione del tempo di segnali di spostamento X_{v1} , X_p , X_{v2} , e X_{str} , rispettivamente, della prima valvola 32, della micro-pompa 34, della seconda valvola 36 e della struttura deformabile 20. Questi segnali di spostamento X_{v1} , X_p , X_{v2} , e X_{str} sono indicativi di spostamenti misurati lungo l'asse Z della prima valvola 32, della micro-pompa 34, della seconda valvola 36 e della struttura deformabile 20 dalle rispettive posizioni in condizione di riposo. Ad esempio, il segnale di spostamento X_{v1} fa riferimento allo spostamento lungo l'asse Z della membrana 35 della prima valvola 32 rispetto alla sua posizione a riposo (es., spostamento del corpo di membrana 38 nella cavità sepolta 39), cioè quando non viene

polarizzato il rispettivo strato piezoelettrico 37b; invece, il segnale di spostamento X_{v1} fa riferimento allo spostamento lungo l'asse Z della superficie superiore 23e della struttura deformabile 20 rispetto alla sua posizione a riposo, cioè
5 quando non viene pompata aria nello spazio interno 24 (in altre parole, è pari alla differenza fra la dimensione massima di allungamento D_{a11} della struttura deformabile 20 nella posizione di allungamento e la dimensione massima di allungamento D_{a11} della struttura deformabile 20 nella
10 posizione di riposo).

In particolare, il metodo di controllo dell'attuatore MEMS 10 comprende una o più iterazioni eseguite in successione fra loro. La prima iterazione inizia con l'attuatore MEMS 10 in una condizione di riposo (cioè quando
15 non è eseguito alcun pompaggio d'aria nello spazio interno 24, e dunque la prima valvola 32 è in stato aperto, la micro-pompa 34 è in stato inattivo e la seconda valvola 36 è in stato aperto). Ciascuna iterazione comprende, in successione fra loro:

20 a) chiudere la prima valvola 32, lasciare inattiva la micro-pompa 34 e lasciare aperta la seconda valvola 36 (cioè S_{v1} assume il secondo valore, S_p assume il primo valore e S_{v2} assume il primo valore, come mostrato all'istante t_1), affinché la parte del canale fluidico 25 dopo la prima
25 valvola 32 sia pneumaticamente disaccoppiata dalla parte del

canale fluidico 25 prima della prima valvola 32;

b) lasciare chiusa la prima valvola 32, attivare la micro-pompa 34 e lasciare aperta la seconda valvola 36 (cioè S_{v1} assume il secondo valore, S_p assume il secondo valore e
5 S_{v2} assume il primo valore, come mostrato all'istante t_2), affinché la micro-pompa 34 pompi aria verso lo spazio interno 24 (il valore del segnale di spostamento X_{str} cresce rispetto al passo a);

c) lasciare chiusa la prima valvola 32, lasciare attiva
10 la micro-pompa 34 e chiudere la seconda valvola 36 (cioè S_{v1} assume il secondo valore, S_p assume il secondo valore e S_{v2} assume il secondo valore, come mostrato all'istante t_3), affinché la parte del canale fluidico 25 dopo la seconda valvola 36 sia pneumaticamente disaccoppiata dalla parte del
15 canale fluidico 25 prima della seconda valvola 36;

d) aprire la prima valvola 32, lasciare attiva la micro-pompa 34 e lasciare chiusa la seconda valvola 36 (cioè S_{v1} assume il primo valore, S_p assume il secondo valore e S_{v2} assume il secondo valore, come mostrato all'istante t_4),
20 affinché la parte del canale fluidico 25 compresa fra la prima e la seconda valvola 32 e 36 torni ad esser in comunicazione di fluido con l'ambiente esterno;

e) lasciare aperta la prima valvola 32, disattivare la micro-pompa 34 e lasciare chiusa la seconda valvola 36 (cioè
25 S_{v1} assume il primo valore, S_p assume il primo valore e S_{v2}

assume il secondo valore, come mostrato all'istante t_5), affinché dell'aria venga risucchiata dall'ambiente esterno verso la parte del canale fluidico 25 compresa fra la prima e la seconda valvola 32 e 36; e

5 f) chiudere la prima valvola 32, lasciare inattiva la micro-pompa 34 e lasciare chiusa la seconda valvola 36 (cioè S_{v1} assume il secondo valore, S_p assume il primo valore e S_{v2} assume il secondo valore, come mostrato all'istante t_6), così da isolare pneumaticamente la parte del canale fluidico 25
10 compresa fra la prima e la seconda valvola 32 e 36 sia dall'ambiente esterno che dallo spazio interno 24.

 Ripetendo i passi a-f, e dunque eseguendo più iterazioni del metodo di controllo, è possibile far aumentare progressivamente la quantità d'aria nello spazio interno 24,
15 e dunque deformare sempre di più la struttura deformabile 20 per aumentarne la dimensione massima di allungamento D_{all} .

 Con riferimento alle figure 7A-7I, viene ora descritto un processo di fabbricazione dell'attuatore MEMS 10, secondo una forma di realizzazione.

20 In dettaglio, la figura 7A mostra una prima fetta 50 di materiale semiconduttore (es., silicio) atta a formare il primo substrato 40. La prima fetta 50 presenta una prima superficie 50a e una seconda superficie 50b, opposte fra loro lungo l'asse Z.

25 Con riferimento alla figura 7B, una prima cavità sepolta

52 è formata in corrispondenza della prima superficie 50a della prima fetta 50. Parallelamente al piano XY, la prima cavità sepolta 52 presenta forma anulare (in dettaglio, forma a ciambella) e centralmente ad essa si estende una prima regione di raccordo 51 della prima fetta 50 atta a formare la prima porzione di raccordo 23a. In particolare, la prima regione di raccordo 51 presenta parallelamente al piano XY la prima dimensione massima esterna $D_{e,1}$, mentre la prima cavità sepolta 52 presenta parallelamente al piano XY una prima dimensione massima di cavità $D_{c,1}$ (es., misurata fra pareti laterali della prima cavità sepolta 52 che sono opposte fra loro lungo l'asse X o Y) maggiore della prima dimensione massima esterna $D_{e,1}$. Ad esempio, nella forma di realizzazione esemplificativamente considerata in cui la prima cavità sepolta 52 ha forma circolare, la prima dimensione massima di cavità $D_{c,1}$ coincide con un diametro maggiore della sezione anulare formata dalla prima cavità sepolta 52, mentre la prima dimensione massima esterna $D_{e,1}$ coincide con un diametro minore della sezione anulare formata dalla prima cavità sepolta 52.

In dettaglio, la prima cavità sepolta 52 è realizzata tramite il noto processo "VenSen" (anche chiamato processo "Venice", e divulgato ad esempio nei documenti brevettuali US7294536 e US2008261345). In maggior dettaglio, trincee di lavoro (non mostrate) sono formate in una regione della prima

superficie 50a della prima fetta 50 destinata a diventare la prima cavità sepolta 52. In tale regione della prima fetta 50 viene formato, ad esempio usando noti passaggi litografici e di attacco chimico selettivo, un gruppo di trincee di lavoro che delimitano una rispettiva pluralità di pilastri (non mostrati) di materiale semiconduttore. Mediante una fase di crescita epitassiale, uno strato epitassiale (non mostrato) è cresciuto sulla prima superficie 50a della prima fetta 50 (che quindi aumenta di spessore), alla quale sono affacciate le trincee di lavoro. Vengono quindi eseguite una o più fasi di trattamento termico ("annealing") della prima fetta 50, ad esempio in ambiente riducente (es., in atmosfera di idrogeno) e a temperature elevate (es., superiori a 1000°C). L'una o più fasi di trattamento termico provocano una migrazione degli atomi di semiconduttore, qui silicio, che tendono a portarsi in una posizione di minore energia: di conseguenza, gli atomi di semiconduttore dei pilastri migrano completamente, formando la prima cavità sepolta 52. La cavità sepolta 52 è dunque delimitata superiormente da uno strato di semiconduttore formato in parte da atomi cresciuti epitassialmente e in parte da atomi migrati; tale strato di semiconduttore forma uno strato di chiusura della prima fetta 50 e realizza una nuova prima superficie della prima fetta 50 (la prima superficie della prima fetta 50 di figura 7B essendo sovrapposta lungo l'asse Z alla prima

superficie 50a della prima fetta 50 di figura 7A ed essendo opposta alla prima seconda superficie 50b della prima fetta 50 lungo l'asse Z, e quindi essendo indicata nuovamente con il riferimento 50a).

5 Con riferimento alla figura 7C, una seconda cavità sepolta 54 è formata in corrispondenza della prima superficie 50a della prima fetta 50 di figura 7B, tramite il processo VenSen precedentemente descritto. La seconda cavità sepolta 54 è sovrapposta lungo l'asse Z alla prima cavità sepolta 52
10 ed è atta a formare il primo sottospazio interno 26'. La seconda cavità sepolta 54 presenta parallelamente al piano XY la seconda dimensione massima interna $D_{i,2}$ ed in particolare, nella presente forma di realizzazione, presenta forma circolare.

15 Con riferimento alla figura 7D, una terza cavità sepolta 56 è formata in corrispondenza della prima superficie 50a della prima fetta 50 di figura 7C, tramite il processo VenSen. La terza cavità sepolta 56 è sovrapposta lungo l'asse Z alla seconda cavità sepolta 54 ed è analoga alla prima
20 cavità sepolta 52 e dunque non viene nuovamente descritta in dettaglio; inoltre, centralmente alla terza cavità sepolta 56 si estende una seconda regione di raccordo 55 della prima fetta 50 atta a formare la seconda porzione di raccordo 23c.

 Con riferimento alla figura 7E, una quarta cavità
25 sepolta 58 è formata in corrispondenza della prima superficie

50a della prima fetta 50 di figura 7D, tramite il processo VenSen. La quarta cavità sepolta 58 è sovrapposta lungo l'asse Z alla terza cavità sepolta 56 ed è atta a formare il secondo sottospazio interno 26". La quarta cavità sepolta 58
5 è analoga alla seconda cavità sepolta 54 e dunque non viene nuovamente descritta in dettaglio. La prima fetta 50 al termine della fase di figura 7E definisce il primo substrato 40, dove la seconda superficie 40b del substrato 40 coincide con la seconda superficie 50b della prima fetta 50 e la prima
10 superficie 40a del substrato 40 coincide con la prima superficie 50a della prima fetta 50 di figura 7E.

Opzionalmente, nella fase mostrata in figura 7E vengono anche formate le cavità sepolte (o quinte cavità sepolte) 39 della prima valvola 32, della micro-pompa 34 e della seconda
15 valvola 36, tramite il processo VenSen, ad esempio contemporaneamente alla realizzazione della quarta cavità sepolta 58. In dettaglio, le cavità sepolte 39 si estendono lateralmente alla quarta cavità sepolta 58, in regioni della prima superficie 50a della prima fetta 50 di figura 7D atte
20 ad ospitare la prima valvola 32, la micro-pompa 34 e la seconda valvola 36. In maggior dettaglio, le cavità sepolte 39 si estendono allo stesso livello della quarta cavità sepolta 58 lungo l'asse Z.

Nella fase di fabbricazione (opzionale) mostrata in
25 figura 7F, vengono formate le strutture di attuazione 37

della prima valvola 32, della micro-pompa 34 e della seconda valvola 36, secondo tecniche di fabbricazione di per sé note e dunque non discusse in dettaglio. In particolare, le strutture di attuazione 37 sono formate sulle rispettive
5 cavità sepolte 39, cioè sono sovrapposte lungo l'asse Z a queste ultime.

Con riferimento alla figura 7G, viene eseguito un primo attacco (in dettaglio, attacco chimico secco, "chemical dry etch", quale "deep reactive ion etching", ad esempio tramite
10 fluoruri quali XeF_2) sul primo substrato 40 per formare la cavità di alloggiamento 22 e dunque per definire esternamente la struttura deformabile 20. In dettaglio, il primo attacco è eseguito in una seconda regione esposta 60 della prima superficie 40a del primo substrato 40, che presenta forma
15 anulare e che è sovrapposta, lungo l'asse Z, alle cavità sepolte 52-58. La seconda regione esposta 60 della prima superficie 40a rimane esposta da uno strato di photoresist (non mostrato) che viene depositato sulla prima superficie 40a del primo substrato 40 per operare come maschera per il
20 primo attacco. In maggior dettaglio, la seconda regione esposta 60 presenta parallelamente al piano XY sezione anulare definita da una terza dimensione massima interna $D_{i,3}$ (misurata parallelamente al piano XY, ad esempio lungo l'asse X, e pari alla seconda dimensione massima esterna $D_{e,2}$) e da
25 una terza dimensione massima esterna $D_{e,3}$ (misurata

parallelamente al piano XY, ad esempio lungo l'asse X) maggiore della terza dimensione massima interna $D_{i,3}$. Nella forma di realizzazione esemplificativamente considerata in cui la struttura deformabile 20 ha forma circolare nel piano XY, la terza dimensione massima interna $D_{i,3}$ coincide con un diametro minore della sezione anulare formata dalla seconda regione esposta 60, mentre la terza dimensione massima esterna $D_{e,3}$ coincide con un diametro maggiore della sezione anulare formata dalla seconda regione esposta 60.

In dettaglio, il primo attacco di figura 7G viene eseguito in modo da formare una prima trincea 62 con forma anulare che si estende a partire dalla prima superficie 40a del primo substrato 40 verso la seconda superficie 40b del primo substrato 40, senza raggiungere quest'ultima. In particolare, la prima trincea 62 si estende dalla prima superficie 40a del primo substrato 40 attraverso la terza cavità sepolta 56 fino a raggiungere la prima cavità sepolta 52, ponendo in comunicazione fluidica con l'ambiente esterno sia la prima cavità sepolta 52 che la terza cavità sepolta 56. La prima trincea 62, la prima cavità sepolta 52 e la terza cavità sepolta 56 sono dunque unite fra loro e formano la cavità di alloggiamento 22 che separa fisicamente la struttura deformabile 20 dal primo substrato 40, al quale la struttura deformabile 20 rimane accoppiata solo tramite la prima porzione di raccordo 23a.

Con riferimento alla figura 7H, viene eseguito un secondo attacco (in dettaglio, attacco chimico secco, "chemical dry etch", quale "deep reactive ion etching", ad esempio tramite fluoruri quali XeF_2) sul primo substrato 40 per formare il canale fluidico 25 e per definire internamente la struttura deformabile 20. Il secondo attacco è eseguito sulla seconda superficie 40b del primo substrato 40, e forma una seconda trincea 64 che si estende lungo l'asse Z a partire dalla seconda superficie 40b del primo substrato 40 fino alla quarta cavità sepolta 58, attraverso la prima e la seconda regione di raccordo 51 e 55. In altre parole, nella presente forma di attuazione la seconda trincea 64 si estende centralmente rispetto alle cavità sepolte 52-58. Di conseguenza, la seconda trincea 64 forma l'apertura 21 e il foro di comunicazione 27, così da porre in comunicazione fluidica sia fra loro che con l'ambiente esterno la seconda e la quarta cavità sepolta 54 e 58, formando così lo spazio interno 24. Inoltre, la seconda trincea 64 forma parte del canale fluidico 25, e in dettaglio forma la prima estremità 25' del canale fluidico 25.

Opzionalmente, l'attacco di figura 7H forma anche: una terza trincea 66 che si estende dalla seconda superficie 40b del primo substrato 40 alla cavità sepolta 39 della prima valvola 32, e che forma la prima porzione 25a del canale fluidico 25; una quarta trincea 68 che si estende dalla

seconda superficie 40b del primo substrato 40 alla cavità sepolta 39 della seconda valvola 36, e che forma la seconda porzione 25b del canale fluidico 25; e una cavità esposta 70 affacciata alla seconda superficie 40b del primo substrato 40, che si estende lungo l'asse X fra la seconda trincea 64 e la quarta trincea 68 e che è atta a formare la terza porzione 25c del canale fluidico 25.

Con riferimento alla figura 7I (fase opzionale), una seconda fetta di materiale semiconduttore (es., silicio) realizza il secondo substrato 41 e viene fissata al primo substrato 40, ad esempio tramite incollaggio. In dettaglio, lo strato di fissaggio 42 viene depositato, secondo tecniche di per sé note, fra le seconde superfici 40b e 41b del primo e del secondo substrato 40 e 41 in modo da incollarli reciprocamente. Ciò permette di chiudere la cavità esposta 70, formando così la terza porzione 25c del canale fluidico 25. Inoltre, i substrati 40 e 41 sono accoppiati fra loro in modo da non ostruire la seconda estremità 25'' del canale fluidico 25, che rimane affacciata all'ambiente esterno. Di conseguenza, lo spazio interno 24 è in comunicazione fluidica con l'ambiente esterno solamente tramite il canale fluidico 25 attraverso cui si estende il gruppo di pompaggio 30.

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

In particolare, la struttura deformabile 20 permette di raggiungere allungamenti e forze di attuazione maggiori rispetto a quelli degli attuatori MEMS di tipo noto, ad esempio basati su tecnologie piezoelettriche. In dettaglio,
5 la forza di attuazione F_{att} esercitabile da parte della struttura deformabile 20 è ad esempio compresa fra 300 mN e 500 mN.

Ciò è permesso sia grazie alla forma della struttura deformabile 20 che al gruppo di pompaggio 30 che può pompare
10 efficientemente una elevata quantità d'aria nello spazio interno 24.

Inoltre, la struttura deformabile 20 e il gruppo di pompaggio 30 sono integrati nell'attuatore MEMS 10, che presenta dimensioni ridotte (es., dell'ordine di centinaia
15 di μm).

Inoltre, il processo di fabbricazione precedentemente descritto permette di fabbricare in modo semplice ed economico l'attuatore MEMS 10.

Risulta infine chiaro che al trovato qui descritto ed
20 illustrato possono essere apportate modifiche e varianti senza per questo uscire dall'ambito protettivo della presente invenzione, come definito nelle rivendicazioni allegate. Ad esempio, le diverse forme di realizzazione qui descritte possono esser combinate fra loro per fornire
25 ulteriori soluzioni.

Inoltre, il gruppo di pompaggio 30 può presentare più di una micro-pompa 34, come mostrato nella forma di realizzazione di figura 8. In questo caso, le micro-pompe 34 sono disposte in serie fra loro lungo il canale fluidico 25, fra la prima e la seconda valvola 32 e 36. La pluralità di micro-pompe 34 permette di migliorare la capacità di pompaggio di aria del gruppo di pompaggio 30, aumentando la pressione applicabile all'aria presente fra la prima e la seconda valvola 32 e 36.

La struttura deformabile 20 può esser asimmetrica nel piano XZ. In altre parole, come mostrato nella figura 9, il foro di comunicazione fluidica 27 e l'apertura 21 sono allineati fra loro lungo l'asse di simmetria 16 che, nella presente forma di realizzazione, è parallelo all'asse Z ma diverso (non coincidente) dall'asse di mezzeria 15. Dunque il foro di comunicazione fluidica 27 e l'apertura 21 sono decentrati nel piano XY rispetto all'asse di mezzeria 15, e sono lateralmente sfalsati rispetto ad un centro (es., baricentro) nel piano XY della superficie superiore 23e della struttura deformabile 20. Inoltre, la prima porzione di raccordo 23a e la seconda porzione di raccordo 23c sono concentriche fra loro, simmetriche rispetto all'asse di simmetria 16, ed eccentriche rispetto all'asse di mezzeria 15 della struttura deformabile 20, qui diverso dall'asse di simmetria 16. Di conseguenza, anche la deformazione della

struttura deformabile 20 è asimmetrica, e in particolare la superficie superiore 23e della struttura deformabile 20 si inclina trasversalmente alla prima superficie 12a del corpo semiconduttore 12 quando la struttura deformabile 20 si deforma a causa del pompaggio d'aria nello spazio interno 24 (come si può anche vedere in figura 10). In questo modo, è possibile raggiungere una dimensione massima di allungamento D_{all} maggiore rispetto al caso della struttura deformabile 20 simmetrica, a parità di capacità di pompaggio applicata e di dimensioni dell'attuatore MEMS 10.

Come mostrato in figura 10, la struttura deformabile 20 può anche presentare forme nel piano XY diverse da quella circolare, e ad esempio forma rettangolare. Esempi di altre forme poligonali possono esser forma quadrata, esagonale, ottagonale, ecc.

Inoltre, la struttura deformante 20 può comprendere più di due porzioni deformanti 23b e 23d e più di due porzioni di raccordo 23a e 23c, in modo da aumentare lo spazio interno 24 e la capacità della struttura deformante 20 di allungarsi lungo l'asse Z.

Inoltre, il gruppo di pompaggio può anche pompare nello spazio interno 24 un fluido diverso dall'aria, ad esempio acqua o olio.

RIVENDICAZIONI

1. Attuatore MEMS (10) comprendente:

- un corpo semiconduttore (12) di materiale semiconduttore avente una prima superficie (12a) e una
5 seconda superficie (12b) opposte fra loro lungo un primo
asse (Z), e definente una cavità di alloggiamento (22) che
è affacciata alla prima superficie (12a) del corpo
semiconduttore (12) e che presenta una superficie inferiore
(22a), opposta alla prima superficie (12a) del corpo
10 semiconduttore (12) lungo il primo asse (Z), e una o più
superfici laterali (22b) che uniscono la superficie
inferiore (22a) della cavità di alloggiamento (22) alla prima
superficie (12a) del corpo semiconduttore (12), il corpo
semiconduttore (12) definendo inoltre un canale fluidico
15 (25) estendentesi nel corpo semiconduttore (12) e avente una
prima estremità (25') estendentesi attraverso la superficie
inferiore (22a) della cavità di alloggiamento (22); e
- una struttura deformabile (20) che si estende nella
cavità di alloggiamento (22), è accoppiata al corpo
20 semiconduttore (12) in corrispondenza della superficie
inferiore (22a) della cavità di alloggiamento (22), si
estende a distanza dall'una o più superfici laterali (22b)
della cavità di alloggiamento (22), presenta una superficie
superiore (23e) opposta alla superficie inferiore (22a)
25 della cavità di alloggiamento (22) rispetto alla struttura

deformabile (20), e definisce uno spazio interno (24) che è affacciato alla prima estremità (25') del canale fluidico (25) e che comprende almeno un primo sottospazio interno (26') e un secondo sottospazio interno (26'') sovrapposti fra loro lungo il primo asse (Z) e pneumaticamente connessi fra loro e con il canale fluidico (25),

in cui, quando un fluido è pompato attraverso il canale fluidico (25) nello spazio interno (24), il primo sottospazio interno (26') e il secondo sottospazio interno (26'') si espandono deformando la struttura deformabile (20) lungo il primo asse (Z) e generando una forza di attuazione (F_{att}) esercitata dalla superficie superiore (23e) della struttura deformabile (20) lungo il primo asse (Z), in direzione opposta rispetto alla cavità di alloggiamento (22).

2. Attuatore MEMS secondo la rivendicazione 1, in cui la struttura deformabile (20) presenta, in sezione lungo un primo piano (XY) ortogonale al primo asse (Z), forma anulare che delimita lo spazio interno (24) radialmente rispetto al primo asse (Z).

3. Attuatore MEMS secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui la struttura deformabile (20) è monolitica con il corpo semiconduttore (12).

4. Attuatore MEMS secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui la struttura deformabile (20) comprende:

- una prima porzione di raccordo (23a) che unisce la struttura deformabile (20) alla superficie inferiore (22a) della cavità di alloggiamento (22) e che definisce un'apertura (21) della struttura deformabile (20), che è affacciata alla prima estremità (25') del canale fluidico (25) e che mette in comunicazione di fluido il canale fluidico (25) con lo spazio interno (24);

- una prima porzione deformante (23b) che è unita alla prima porzione di raccordo (23a) e che definisce il primo sottospazio interno (26'), la prima porzione di raccordo (23a) essendo interposta lungo il primo asse (Z) fra il corpo semiconduttore (12) e la prima porzione deformante (23b);

- una seconda porzione di raccordo (23c) che è unita alla prima porzione deformante (23b) e che definisce un foro di comunicazione fluidica (27) che collega il primo sottospazio interno (26') al secondo sottospazio interno (26''), la prima porzione deformante (23b) essendo interposta lungo il primo asse (Z) fra la prima porzione di raccordo (23a) e la seconda porzione di raccordo (23c); e

- una seconda porzione deformante (23d) che è unita alla seconda porzione di raccordo (23c) e che definisce il secondo sottospazio interno (26''), la seconda porzione di raccordo (23c) essendo interposta lungo il primo asse (Z) fra la prima porzione deformante (23b) e la seconda porzione deformante (23d),

in cui, quando il fluido è pompato attraverso il canale fluidico (25) nello spazio interno (24), la prima porzione deformante (23b) e la seconda porzione deformante (23d) si deformano lungo il primo asse (Z).

5 5. Attuatore MEMS secondo la rivendicazione 4 e la rivendicazione 2, in cui la prima (23a) e la seconda (23c) porzione di raccordo presentano ciascuna, parallelamente al primo piano (XY), forma anulare definita da una prima dimensione massima interna ($D_{i,1}$) e da una prima dimensione
10 massima esterna ($D_{e,1}$) maggiore della prima dimensione massima interna ($D_{i,1}$), la prima dimensione massima interna ($D_{i,1}$) essendo misurata ortogonalmente al primo asse (Z) fra superfici interne (23a') della prima (23a) o seconda (23c) porzione di raccordo che sono opposte fra loro ortogonalmente
15 al primo asse (Z) e sono affacciate allo spazio interno (24), e la prima dimensione massima esterna ($D_{e,1}$) essendo misurata ortogonalmente al primo asse (Z) fra superfici esterne (23a'') della prima (23a) o seconda (23c) porzione di raccordo che sono opposte fra loro ortogonalmente al primo asse (Z) e
20 sono affacciate alla cavità di alloggiamento (22),

in cui la prima (23b) e la seconda (23d) porzione deformante presentano ciascuna, in corrispondenza del rispettivo primo (26') e secondo (26'') sottospazio interno e parallelamente al primo piano (XY), forma anulare definita
25 da una seconda dimensione massima interna ($D_{i,2}$) e da una

seconda dimensione massima esterna ($D_{e,2}$) maggiore della
seconda dimensione massima interna ($D_{i,2}$), la seconda
dimensione massima interna ($D_{i,2}$) essendo misurata
ortogonalmente al primo asse (Z) fra prime superfici interne
5 (23b') della prima (23b) o seconda (23d) porzione deformante
che sono opposte fra loro ortogonalmente al primo asse (Z)
e sono affacciate allo spazio interno (24), e la seconda
dimensione massima esterna ($D_{e,2}$) essendo misurata
ortogonalmente al primo asse (Z) fra prime superfici esterne
10 (23b'') della prima (23b) o seconda (23d) porzione deformante
che sono opposte fra loro ortogonalmente al primo asse (Z)
e sono affacciate alla cavità di alloggiamento (22), e

in cui la prima dimensione massima esterna ($D_{e,1}$) è
minore della seconda dimensione massima interna ($D_{i,2}$).

15 6. Attuatore MEMS secondo la rivendicazione 5, in cui
la prima (23a) e la seconda (23c) porzione di raccordo
presentano ciascuna una terza dimensione massima esterna
($D_{e,3}$), misurata lungo il primo asse (Z) fra seconde superfici
esterne (23b''') della prima (23a) o seconda (23c) porzione
20 di raccordo che sono opposte fra loro lungo il primo asse
(Z) e sono affacciate alla cavità di alloggiamento (22),
minore della seconda dimensione massima esterna ($D_{e,2}$).

7. Attuatore MEMS secondo la rivendicazione 4 e la
rivendicazione 2, o secondo la rivendicazione 5 o 6, in cui
25 la prima porzione di raccordo (23a) e la seconda porzione di

raccordo (23c) sono concentriche fra loro e simmetriche rispetto ad un asse di simmetria (16) coincidente con un asse di mezzeria (15) della struttura deformabile (20), parallelo al primo asse (Z), la struttura deformabile (20) essendo inoltre simmetrica rispetto all'asse di mezzeria (15).

8. Attuatore MEMS secondo la rivendicazione 4 e la rivendicazione 2, o secondo la rivendicazione 5 o 6, in cui la prima porzione di raccordo (23a) e la seconda porzione di raccordo (23c) sono concentriche fra loro, simmetriche rispetto ad un asse di simmetria (16) parallelo al primo asse (Z), ed eccentriche rispetto ad un asse di mezzeria (15) della struttura deformabile (20), parallelo al primo asse (Z) e diverso dall'asse di simmetria (16).

9. Attuatore MEMS secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 4-8, in cui la struttura deformabile (20) comprende inoltre:

- almeno una terza porzione di raccordo che è unita alla seconda porzione deformante (23b) e che definisce un ulteriore foro di comunicazione fluidica che collega il secondo sottospazio interno (26'') ad un terzo sottospazio interno della struttura deformabile (20), la seconda porzione deformante (23d) essendo interposta lungo il primo asse (Z) fra la seconda porzione di raccordo (23c) e l'almeno una terza porzione di raccordo; e

- almeno una terza porzione deformante che è unita all'almeno una terza porzione di raccordo e che definisce il terzo sottospazio interno, la terza porzione di raccordo essendo interposta lungo il primo asse (Z) fra la seconda
5 porzione deformante (23d) e l'almeno una terza porzione deformante,

in cui, quando il fluido è pompato attraverso il canale fluidico (25) nello spazio interno (24), la prima porzione deformante (23b), la seconda porzione deformante (23d) e
10 l'almeno una terza porzione deformante si deformano lungo il primo asse (Z).

10. Attuatore MEMS secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui la struttura deformabile (20) presenta una dimensione massima di allungamento (D_{all})
15 misurata lungo il primo asse (Z) fra la superficie superiore (23e) della struttura deformabile (20) e la superficie inferiore (22a) della cavità di alloggiamento (22),

in cui, quando non viene pompato il fluido nello spazio interno (24), la struttura deformabile (20) è in una
20 posizione di riposo, lo spazio interno (24) presenta un primo volume e la dimensione massima di allungamento (D_{all}) ha un primo valore, e

quando il fluido è pompato nello spazio interno (24), la struttura deformabile (20) è in una posizione di
25 allungamento, lo spazio interno (24) presenta un secondo

volume maggiore del primo volume e la dimensione massima di allungamento (D_{all}) ha un secondo valore maggiore del primo valore.

11. Attuatore MEMS secondo una qualsiasi delle
5 rivendicazioni precedenti, in cui il canale fluidico (25) presenta una seconda estremità (25'') opposta alla prima estremità (25'), e

in cui l'attuatore MEMS comprende inoltre un gruppo di pompaggio (30) che si estende nel canale fluidico (25) fra
10 la prima (25') e la seconda (25'') estremità ed è configurato per pompare il fluido nello spazio interno (24) della struttura deformabile (20).

12. Attuatore MEMS secondo la rivendicazione 11, in cui il gruppo di pompaggio (30) comprende una prima valvola (32),
15 una o più micro-pompe (34) e una seconda valvola (36), l'una o più micro-pompe (34) estendendosi nel canale fluidico (25) fra la prima valvola (32) e la seconda valvola (36), e la seconda valvola (36) estendendosi nel canale fluidico (25) fra l'una o più micro-pompe (34) e la struttura deformabile
20 (20),

in cui la prima (32) e la seconda (36) valvola sono comandabili in una posizione aperta, in cui permettono il passaggio del fluido nel canale fluidico (25), o in una posizione chiusa, in cui impediscono il passaggio del fluido
25 nel canale fluidico (25), e

in cui l'una o più micro-pompe (34) sono comandabili in una posizione di riposo, in cui non presentano deflessione all'interno del canale fluidico (25), o in una posizione di pompaggio, in cui presentano deflessione all'interno del
5 canale fluidico (25).

13. Attuatore MEMS secondo la rivendicazione 12, in cui la prima valvola (32), l'una o più micro-pompe (34) e la seconda valvola (36) sono di tipo piezoelettrico.

14. Metodo di controllo di un attuatore MEMS (10)
10 secondo la rivendicazione 12 o 13, comprendente eseguire in successione fra loro le fasi di:

a) comandare la prima valvola (32) nella posizione chiusa, comandare la micro-pompa (34) nella posizione di riposo e comandare la seconda valvola (36) nella posizione
15 aperta;

b) comandare la prima valvola (32) nella posizione chiusa, comandare la micro-pompa (34) nella posizione di pompaggio e comandare la seconda valvola (36) nella posizione aperta;

20 c) comandare la prima valvola (32) nella posizione chiusa, comandare la micro-pompa (34) nella posizione di pompaggio e comandare la seconda valvola (36) nella posizione chiusa;

d) comandare la prima valvola (32) nella posizione
25 aperta, comandare la micro-pompa (34) nella posizione di

pompaggio e comandare la seconda valvola (36) nella posizione chiusa;

e) comandare la prima valvola (32) nella posizione aperta, comandare la micro-pompa (34) nella posizione di
5 riposo e comandare la seconda valvola (36) nella posizione chiusa; e

f) comandare la prima valvola (32) nella posizione chiusa, comandare la micro-pompa (34) nella posizione di riposo e comandare la seconda valvola (36) nella posizione
10 chiusa.

15. Processo di fabbricazione di un attuatore MEMS (10) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1-13, comprendente le fasi di:

- formare, in corrispondenza di una prima superficie
15 (50a) di una prima fetta (50) di materiale semiconduttore, una prima cavità sepolta (52) di forma anulare che presenta una prima regione di raccordo (51) della prima fetta (50) che si estende, lungo il primo asse (Z), attraverso la prima cavità sepolta (52), la prima fetta (50) avendo inoltre una
20 seconda superficie (50b) opposta alla prima superficie (50a) lungo il primo asse (Z);

- formare, in corrispondenza della prima superficie (50a) della prima fetta (50), una seconda cavità sepolta (54) interposta, lungo il primo asse (Z), fra la prima cavità sepolta (52) e la prima superficie (50a) della prima fetta
25

(50), la seconda cavità sepolta (54) essendo sovrapposta lungo il primo asse (Z) alla prima regione di raccordo (51);

- formare, in corrispondenza della prima superficie (50a) della prima fetta (50), una terza cavità sepolta (56)

5 di forma anulare che presenta una seconda regione di raccordo (55) della prima fetta (50) che si estende, lungo il primo asse (Z), attraverso la terza cavità sepolta (56), la terza cavità sepolta (56) essendo interposta, lungo il primo asse (Z), fra la seconda cavità sepolta (54) e la prima superficie (50a) della prima fetta (50), la seconda regione di raccordo (55) essendo sovrapposta lungo il primo asse (Z) alla seconda cavità sepolta (54);

- formare, in corrispondenza della prima superficie (50a) della prima fetta (50), una quarta cavità sepolta (58)

15 interposta, lungo il primo asse (Z), fra la terza cavità sepolta (56) e la prima superficie (50a) della prima fetta (50), la quarta cavità sepolta (58) essendo sovrapposta lungo il primo asse (Z) alla seconda regione di raccordo (55);

- formare, in corrispondenza della prima superficie (50a) della prima fetta (50), una prima trincea (60) di forma anulare che si estende dalla prima superficie (50a) della prima fetta (50) alla prima cavità sepolta (52), attraverso la terza cavità sepolta (56), a distanza dalla seconda cavità sepolta (54) e dalla quarta cavità sepolta (58); e

25 - formare, in corrispondenza della seconda superficie

(50b) della prima fetta (50), una seconda trincea (64) che si estende dalla seconda superficie (50b) della prima fetta (50) alla quarta cavità sepolta (58), attraverso la seconda cavità sepolta (54), la seconda trincea (64) estendendosi
5 attraverso la prima regione di raccordo (51) e la seconda regione di raccordo (55) e a distanza dalla prima cavità sepolta (52) e dalla terza cavità sepolta (56).

16. Processo di fabbricazione secondo le rivendicazioni 15 e 12, comprendente inoltre le fasi di:

10 - formare, in corrispondenza della prima superficie (50a) della prima fetta (50), quinte cavità sepolte (39) disposte lateralmente fra loro e rispetto alla quarta cavità sepolta (58), le quinte cavità sepolte (39) essendo in connessione di fluido fra loro;

15 - formare, sulla prima superficie (50a) della prima fetta (50), strutture di attuazione (35) di tipo piezoelettrico, ciascuna struttura di attuazione (35) essendo sovrapposta ad una rispettiva delle quinte cavità sepolte (39) e formando con detta rispettiva quinta cavità
20 sepolta (39), rispettivamente, la prima valvola (32), una dell'una o più micro-pompe (34) o la seconda valvola (36);

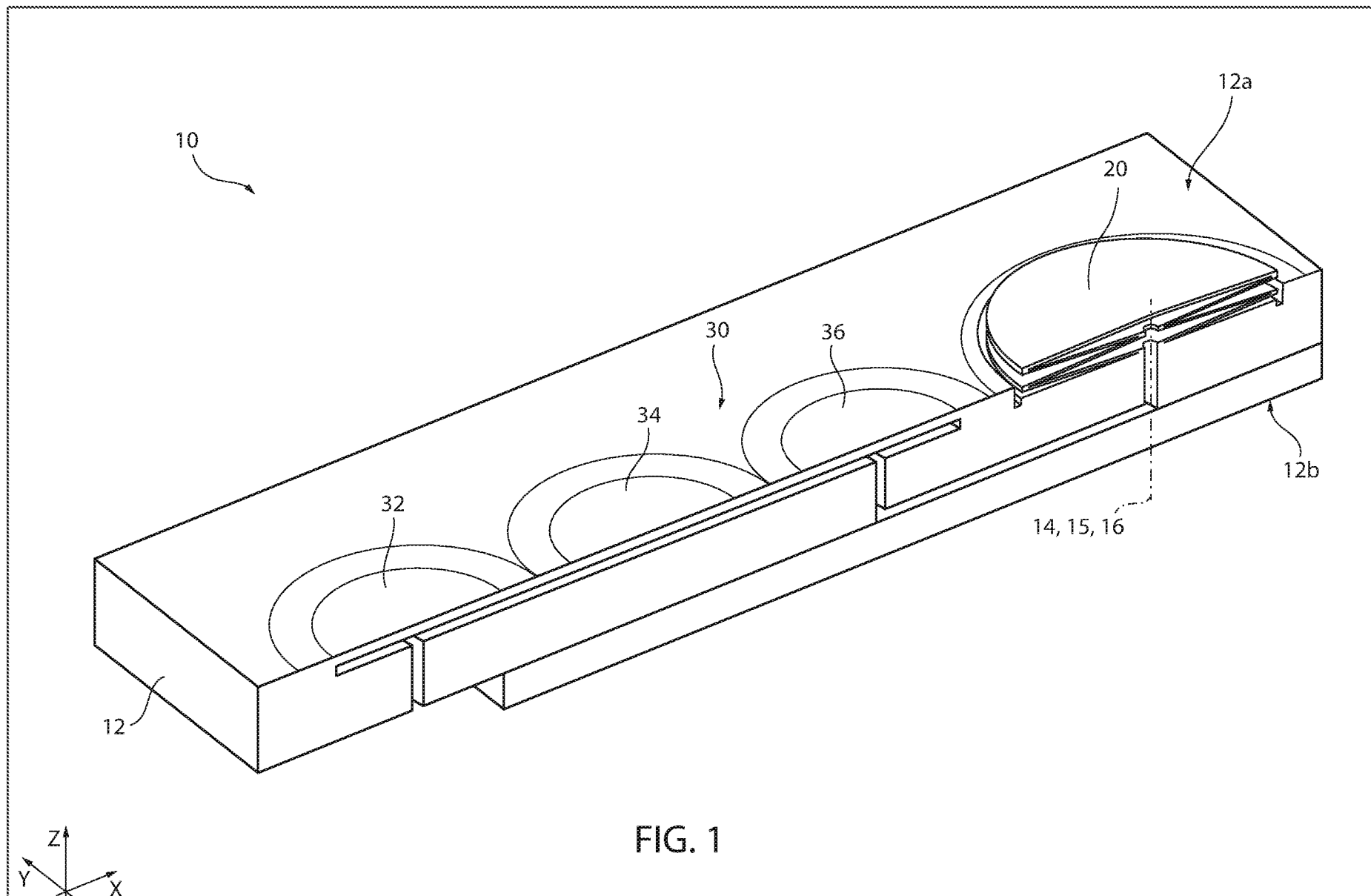
 - formare, in corrispondenza della seconda superficie (50b) della prima fetta (50), una terza trincea (66) che si estende dalla seconda superficie (50b) della prima fetta
25 (50) alla quinta cavità sepolta (39) della prima valvola

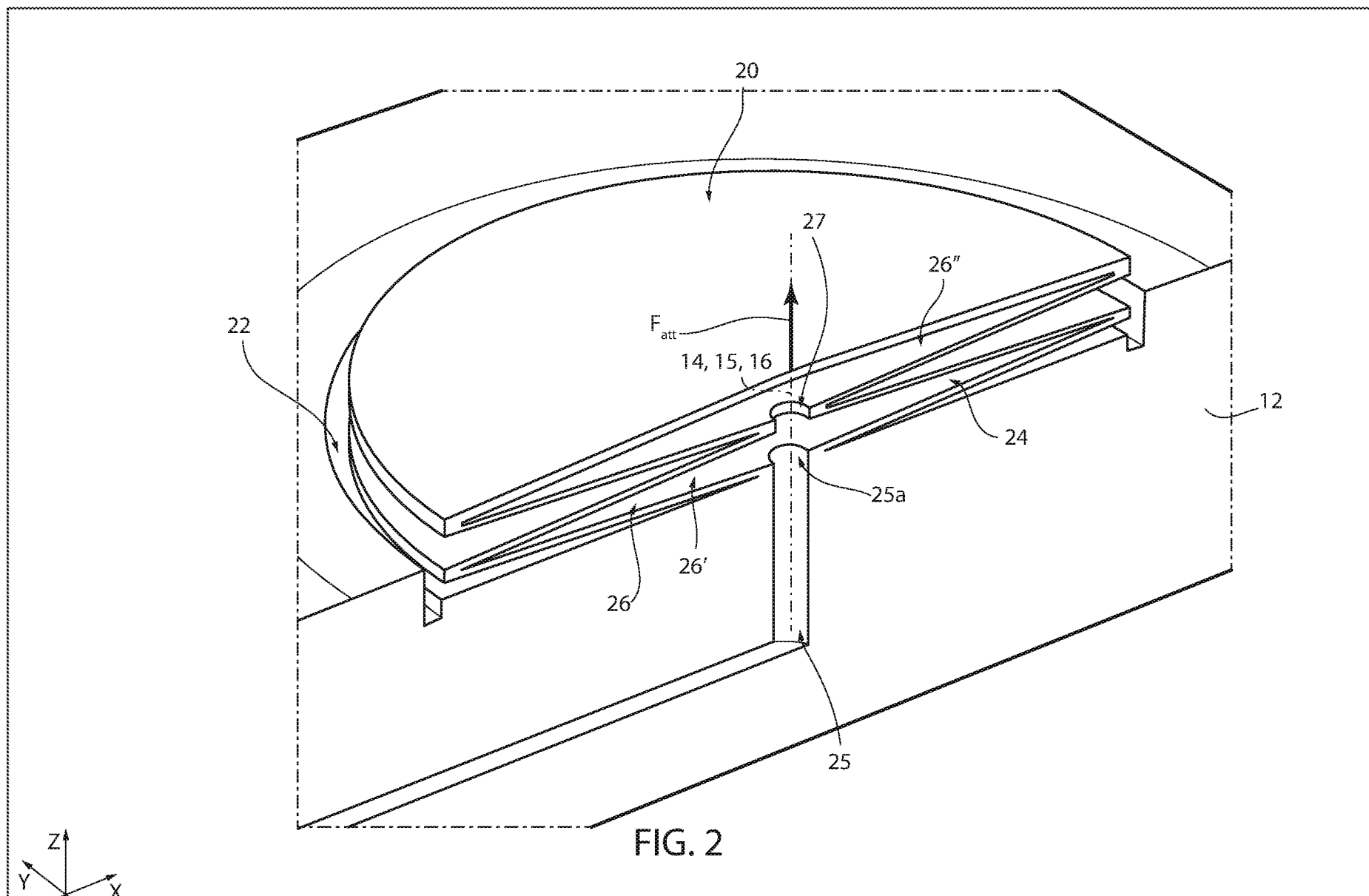
(32);

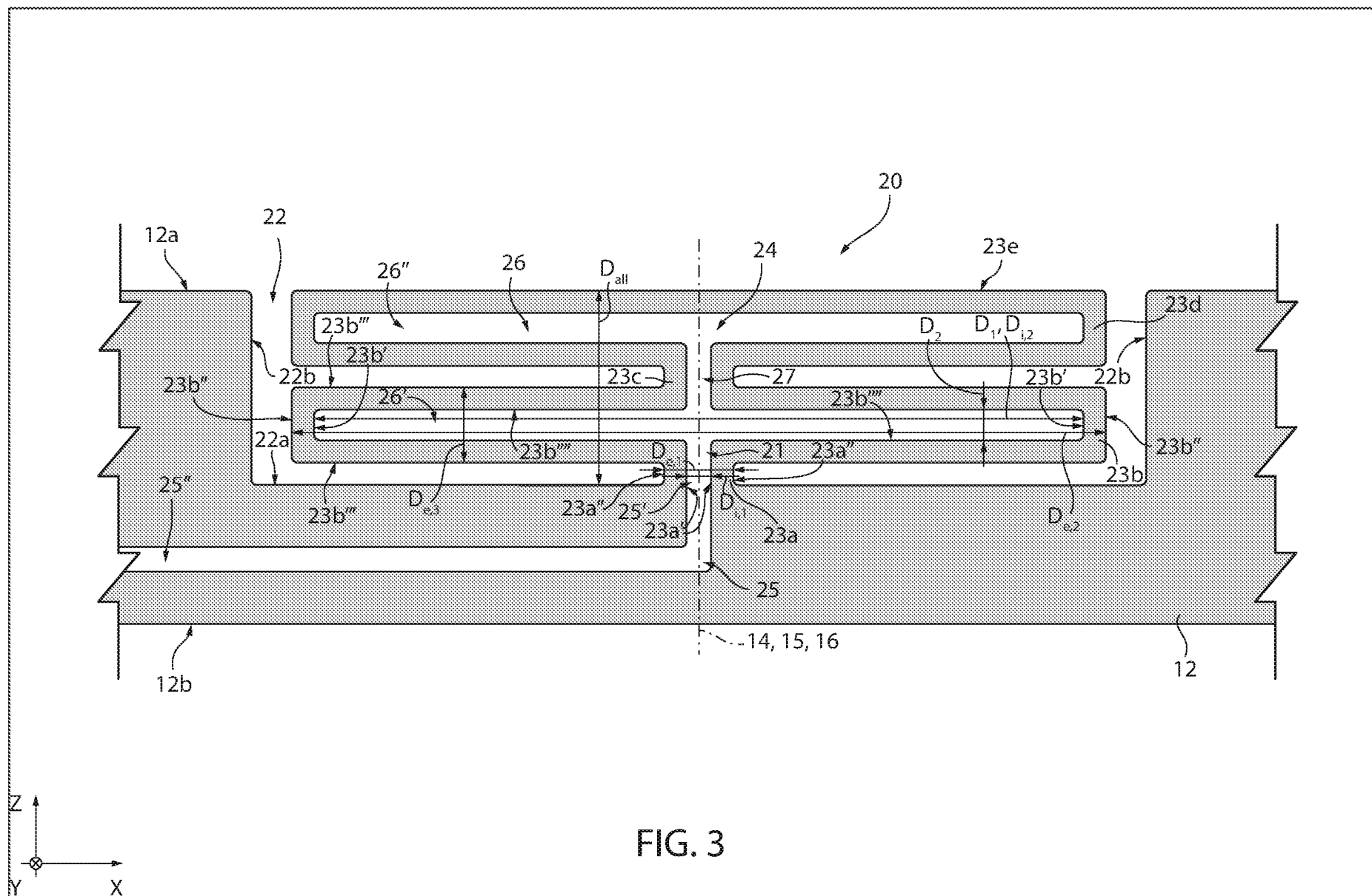
- formare, in corrispondenza della seconda superficie (50b) della prima fetta (50), una quarta trincea (68) che si estende dalla seconda superficie (50b) della prima fetta (50) alla quinta cavità sepolta (39) della seconda valvola (36);

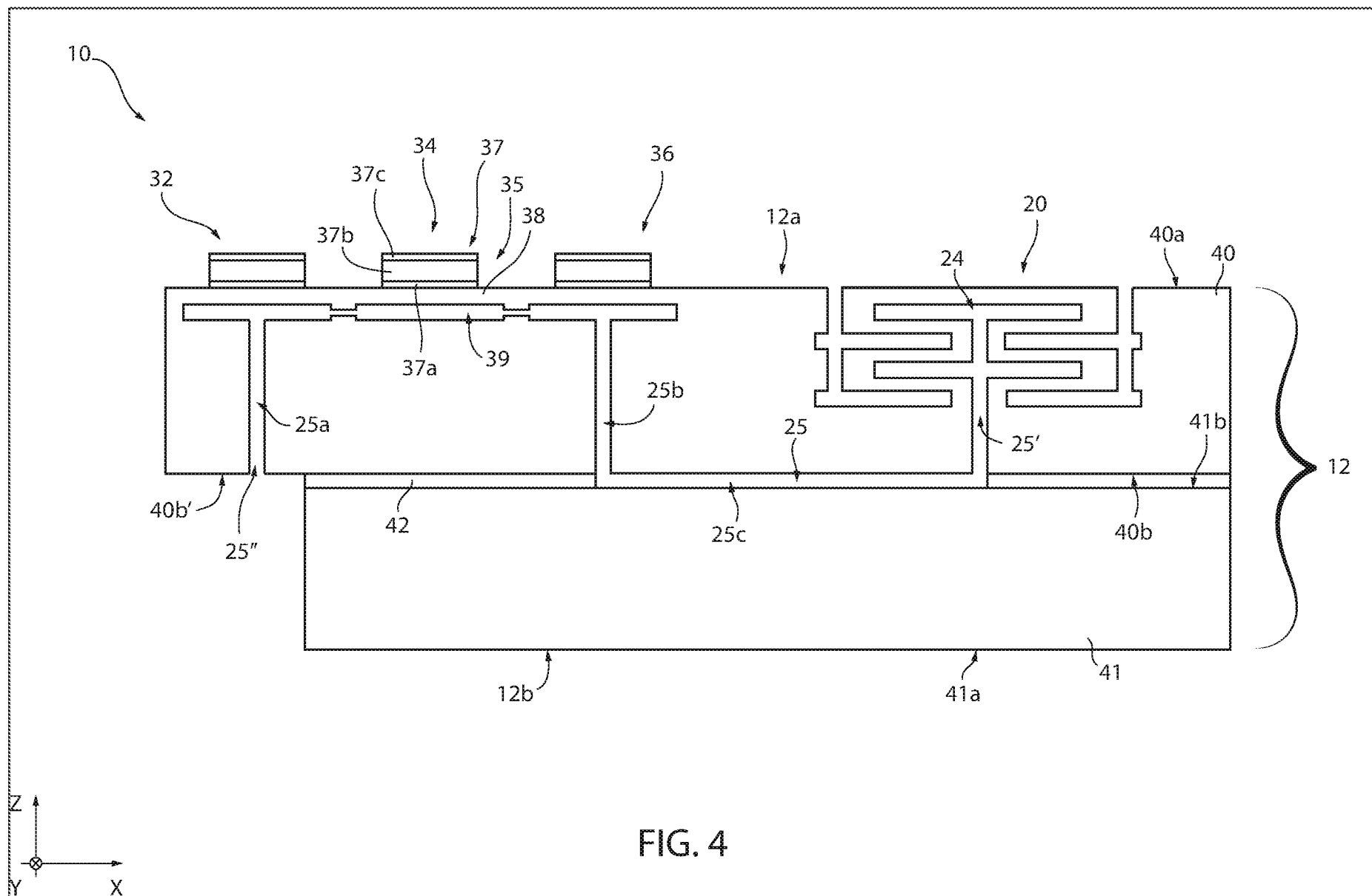
- formare, in corrispondenza della seconda superficie (50b) della prima fetta (50), una cavità esposta (70) che è affacciata alla seconda superficie (50b) della prima fetta (50) e che si estende fra la seconda trincea (64) e la quarta trincea (68); e

- fissare una seconda fetta di materiale semiconduttore alla seconda superficie (50b) della prima fetta (50), definendo così il canale fluidico (25) formato dalla seconda trincea (64), dalla cavità esposta (70), dalla quarta trincea (68), dalle quinte cavità sepolte (39) e dalla terza trincea (66).









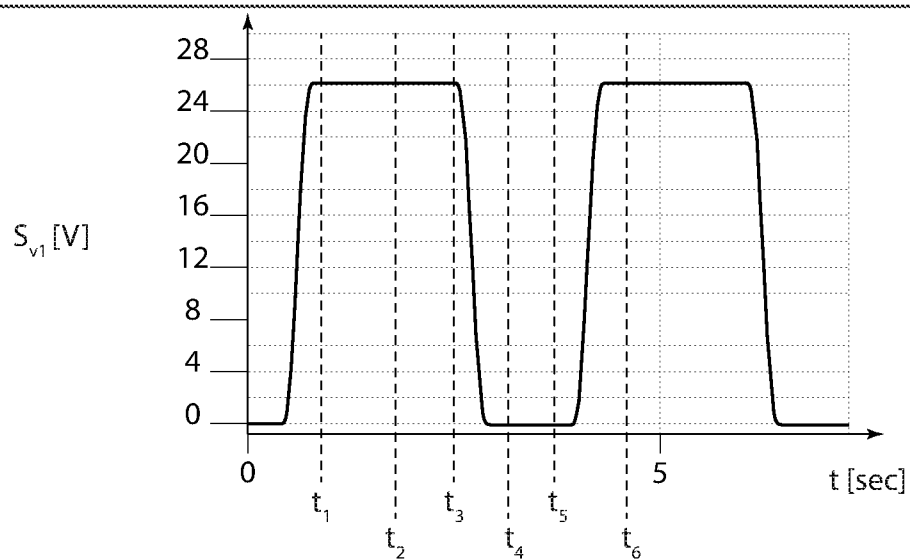


FIG. 5A

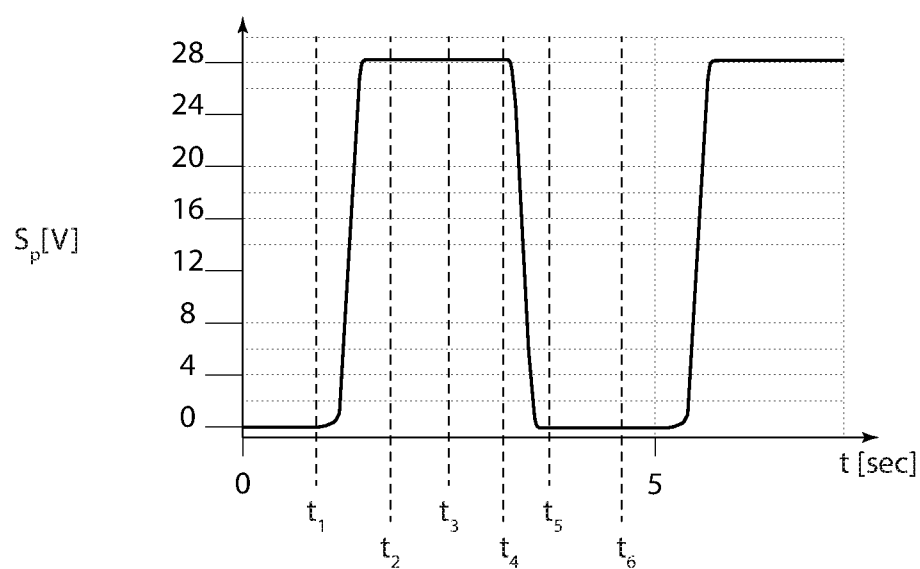


FIG. 5B

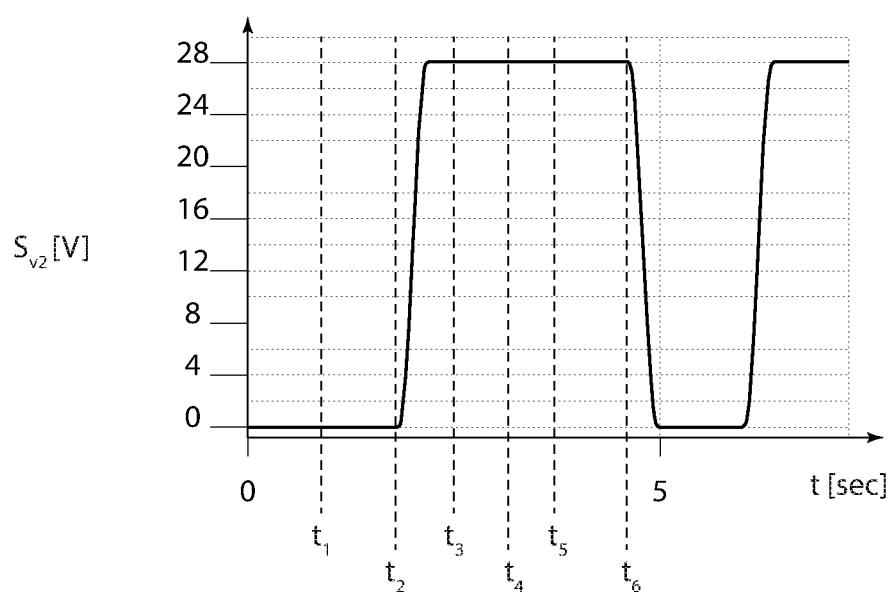


FIG. 5C

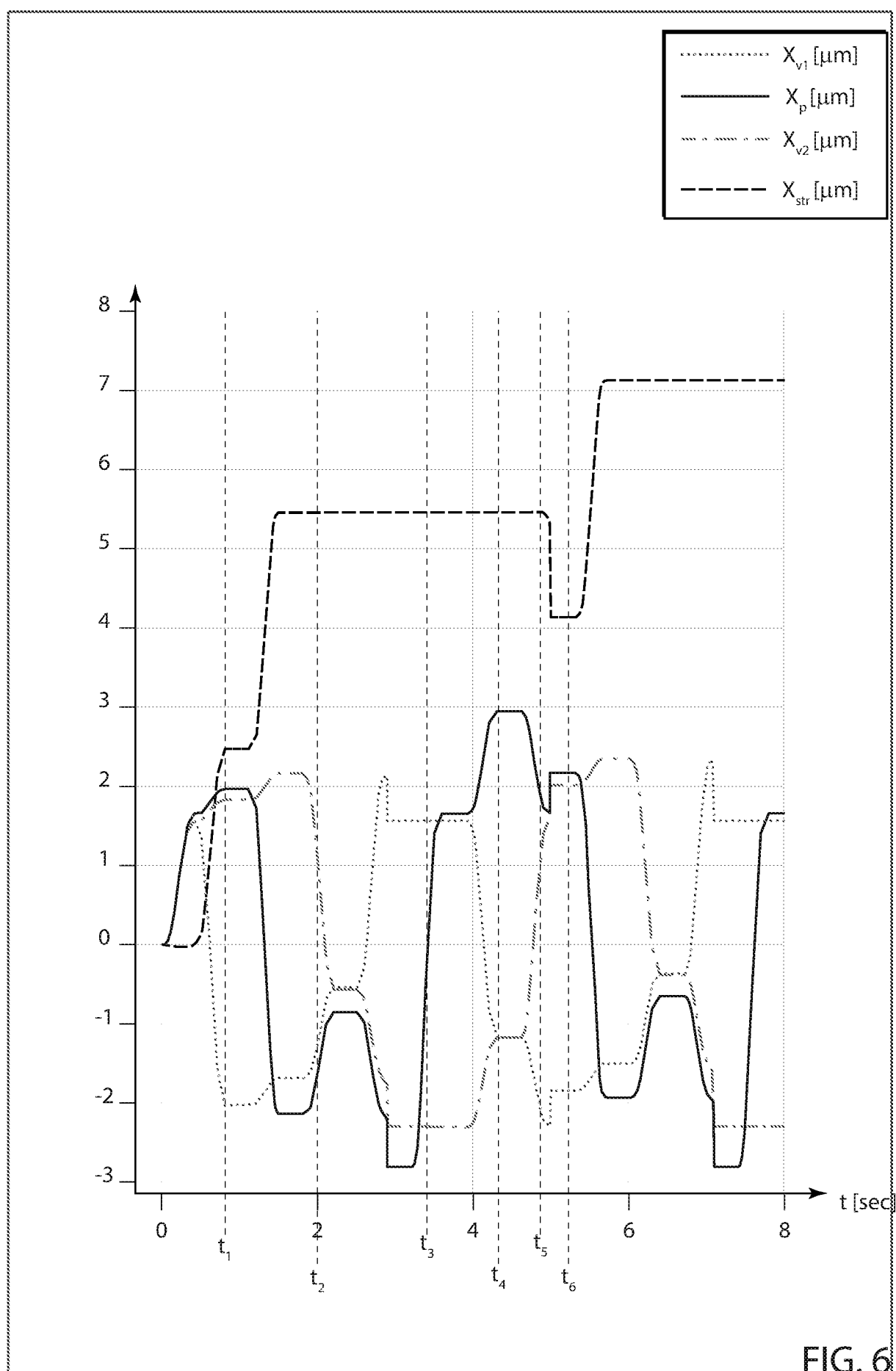


FIG. 6

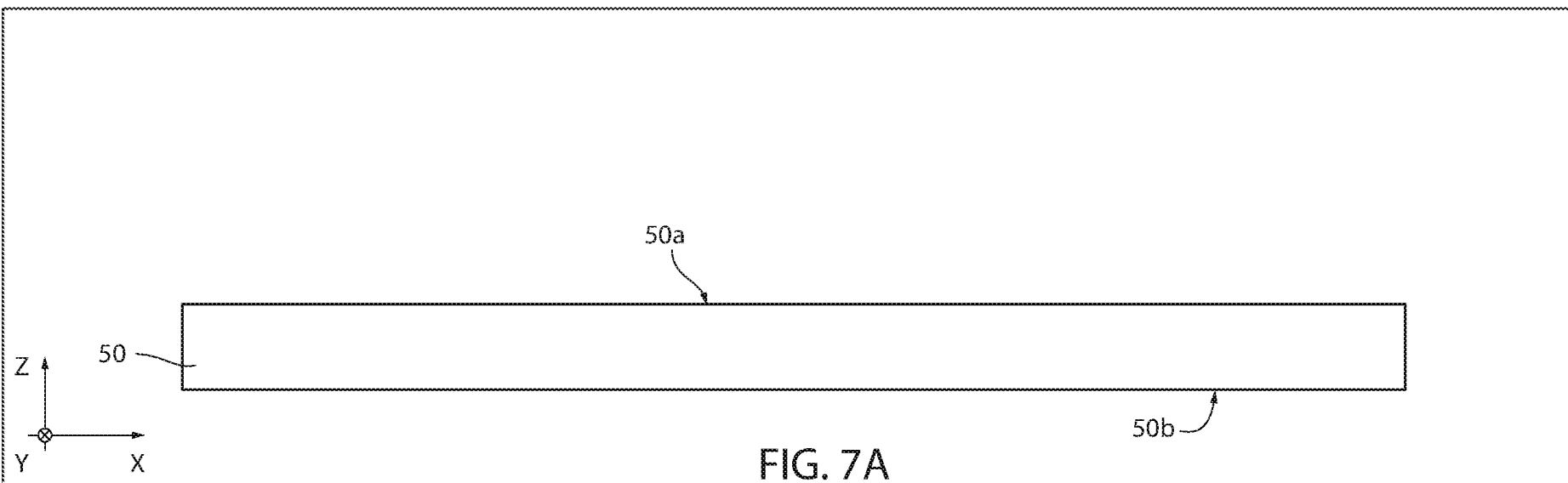


FIG. 7A

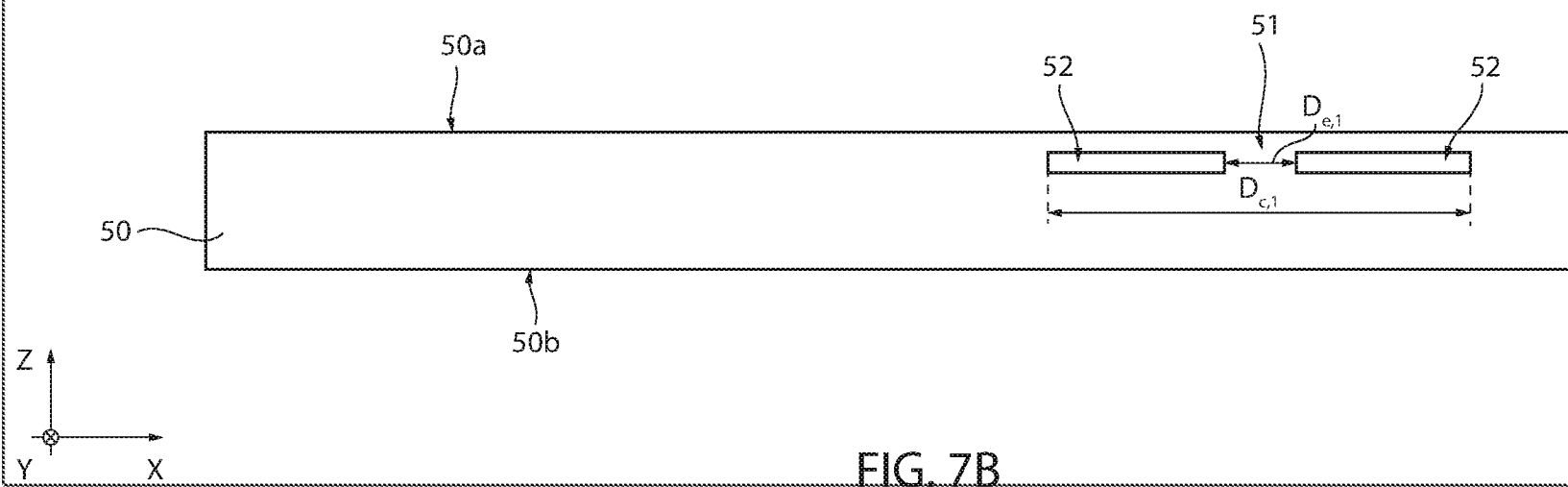


FIG. 7B

