

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102020000010261
Data Deposito	07/05/2020
Data Pubblicazione	07/11/2021

Classifiche IPC

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
H	01	L	41	09

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
H	04	R	7	18

Titolo

ATTUATORE PIEZOELETTRICO DOTATO DI UNA STRUTTURA DEFORMABILE AVENTE
MIGLIORATE PROPRIETA' MECCANICHE E RELATIVO PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"ATTUATORE PIEZOELETTRICO DOTATO DI UNA STRUTTURA DEFORMABILE AVENTE MIGLIORATE PROPRIETA' MECCANICHE E RELATIVO PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI 2, 20864 AGRATE BRIANZA (MB)

Inventori: GIUSTI Domenico, FERRERA Marco, PRELINI Carlo Luigi

* * *

La presente invenzione è relativa ad un attuatore piezoelettrico dotato di una struttura deformabile avente migliorate proprietà meccaniche e al relativo procedimento di fabbricazione. In particolare, si farà riferimento ad un attuatore piezoelettrico realizzato in tecnologia MEMS ("Micro Electro-Mechanical System") quale una valvola di controllo del flusso di un liquido, una micromolla per altoparlante, un microspecchio, un microstrumento quale una micropinza o microforbici.

Come noto, un attuatore MEMS è un dispositivo elettronico realizzato tipicamente a partire da una fetta di materiale semiconduttore, ad esempio silicio, in grado di provocare una deformazione di un elemento mobile quale una membrana o una trave a sbalzo ("cantilever").

Un attuatore MEMS può operare secondo diversi principi

di attuazione, tra cui attuazione elettrostatica, elettromagnetica e piezoelettrica. In dettaglio, gli attuatori MEMS operanti secondo il principio di attuazione piezoelettrica si distinguono per l'elevata efficienza energetica e l'elevata accuratezza di deformazione dell'elemento mobile; per questo motivo sono sempre più diffusi.

Inoltre, sono noti attuatori aventi un sistema di attuazione piezoelettrico che sono utilizzati per realizzare dispositivi quali valvole microfluidiche utilizzate in apparecchi di regolazione di flusso, microspecchi e strumenti chirurgici di precisione.

Qui di seguito si farà riferimento, a titolo esemplificativo, ad un regolatore di flusso. Un regolatore di flusso è un apparecchio che consente di controllare la quantità di fluido che scorre all'interno di un canale fluidico e può essere utilizzato, ad esempio, a livello industriale per controllare parametri di processo di macchinari per la fabbricazione di dispositivi a semiconduttore.

Tipicamente, un regolatore di flusso comprende un canale fluidico, avente una porta di ingresso e una porta di uscita, una valvola che regola la quantità di fluido che scorre nel canale fluidico, un flussimetro che misura il flusso del fluido nel canale fluidico e un'unità di

controllo.

La figura 1 mostra ad esempio la struttura di un regolatore di flusso 10 noto utilizzante un comando piezoelettrico. Il regolatore di flusso 10 comprende un corpo 11; un canale fluidico 12 estendentesi nel corpo 11 ed avente una porta di ingresso 13 e una porta di uscita 14; una valvola 15; un flussimetro 16; e un'unità di controllo 20.

Il canale fluidico 12 comprende qui una prima e una seconda porzione orizzontale 21A, 21B, accoppiate rispettivamente alla porta di ingresso 13 e alla porta di uscita 14 attraverso una prima porzione verticale 22, un passaggio 23 e una seconda porzione verticale 24, fra loro consecutivi.

La prima porzione verticale 22 si estende qui fra la prima porzione orizzontale 21A e una superficie 11A del corpo 11, in corrispondenza della zona della valvola 15, come spiegato sotto; la seconda porzione verticale 24 si estende qui fra la superficie 11A del corpo 11, nella zona della valvola 15, e la seconda porzione orizzontale 21B, ed è separata dalla prima porzione verticale 22 mediante una parete 25 del corpo 11.

Il flussimetro 16 è accoppiato alla prima porzione orizzontale 21A del canale fluidico 12 e all'unità di controllo 20 ed è configurato per misurare una grandezza associata alla quantità di fluido che scorre nel canale

fluidico 12. Ad esempio, il flussimetro 16 può comprendere resistenze elettriche (non mostrate in figura 1) disposte lungo il canale fluidico 12 e aventi resistenza correlata al flusso esistente, in modo di per sé noto.

La valvola 15 comprende un supporto 27 incollato ("bonded") al corpo 11, una membrana 26 fissata al supporto 27, e un sistema di attuazione piezoelettrico 28, portato dalla membrana 26.

In dettaglio, la membrana 26 è formata ad esempio di materiale metallico, è vincolata al corpo 11 attraverso il supporto 27 ed è sospesa sulle ed affacciata alla prima e seconda porzione verticale 22, 24 e alla parete 25 in modo da formare con quest'ultima il passaggio 23 del canale fluidico 12.

Il sistema di attuazione piezoelettrico 28 è accoppiato all'unità di controllo 20 e modifica la distanza della membrana 26 dalla parete 25 per modificare il flusso.

In uso, si desidera che una quantità desiderata di un fluido attraversi il canale fluidico 12. A tal proposito, l'unità di controllo 20 applica una tensione di polarizzazione al sistema di attuazione piezoelettrico 28 che provoca una deformazione della membrana 26. Di conseguenza, la sezione del passaggio 23 varia, modificando la quantità di fluido che scorre nel canale fluidico 12.

In particolare, modulando la tensione di polarizzazione

applicata al sistema di attuazione piezoelettrico 28, è possibile regolare in modo continuo la distanza fra la membrana 26 e la parete 25; quindi la valvola 15 può assumere una pluralità di stati di funzionamento, compresi tra uno stato completamente chiuso e uno stato completamente aperto, corrispondenti rispettivamente ad una quantità di fluido nulla e massima, proporzionalmente al valore della tensione di polarizzazione.

Parallelamente, l'unità di controllo 20 misura il flusso del fluido nel canale fluidico 12 e può controllare il grado di apertura della valvola 15 sulla base del flusso misurato.

Tuttavia, il regolatore di flusso 10 presenta degli svantaggi.

Ad esempio, il regolatore di flusso 10 ha dimensioni elevate. Infatti, il flussimetro 16 è posto a distanza rispetto alla valvola 15.

Inoltre, il sistema di attuazione piezoelettrico 28 ha dimensioni elevate. Ad esempio, essendo realizzato con la tecnica bulk, la massa piezoelettrica può avere uno spessore anche di alcuni millimetri. Di conseguenza, il sistema di attuazione 28 non è adatto ad applicazioni in cui è richiesta una elevata miniaturizzazione.

Inoltre, il sistema di attuazione piezoelettrico 28 necessita di elevate tensioni di polarizzazione, anche di

alcune centinaia di volt, al fine di ottenere deformazioni di decine di micrometri, desiderate in alcune applicazioni. Tali elevate tensioni di polarizzazione possono richiedere complessi e costosi procedimenti di integrazione negli apparecchi sopracitati e possono costituire un pericolo per un utente del regolatore di flusso 10.

In aggiunta, il regolatore di flusso 10 ha una bassa efficienza energetica, dal momento che il flussimetro 16 effettua una rilevazione attiva del flusso del fluido, ovvero tramite un passaggio di corrente. Esso consuma quindi molto.

Scopo della presente invenzione è quello di fornire un attuatore piezoelettrico, che superi le limitazioni delle soluzioni note, in particolare permetta di avere dimensioni ridotte e tensioni di polarizzazione minori rispetto alle soluzioni note.

Secondo la presente invenzione vengono forniti un attuatore piezoelettrico e un relativo procedimento di fabbricazione, come definiti nelle rivendicazioni allegate.

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

- la figura 1 è una sezione trasversale di un regolatore di flusso noto;
- la figura 2 è una vista prospettica dall'alto di

una forma di realizzazione del presente attuatore piezoelettrico;

- la figura 2A è una sezione trasversale di un sensore di deformazione dell'attuatore piezoelettrico di figura 2, in condizione di riposo, presa lungo la linea di sezione IIA-IIA di figura 4;

- la figura 3 è una vista prospettica dal basso dell'attuatore piezoelettrico di figura 2;

- la figura 4 è una vista dall'alto dell'attuatore piezoelettrico di figura 2;

- la figura 4A è una sezione trasversale di un elemento di attuazione dell'attuatore piezoelettrico di figura 2, in condizione di riposo, presa lungo la linea di sezione IVA-IVA di figura 4;

- la figura 4B è una sezione trasversale dell'elemento di attuazione di figura 4A, in condizione deformata, presa lungo la linea di sezione IVA-IVA di figura 4;

- la figura 5 è una vista prospettica dell'attuatore piezoelettrico di figura 2 secondo una prima modalità di utilizzo, in uso;

- la figura 6 è una vista prospettica dell'attuatore piezoelettrico di figura 2 in conformità con una seconda modalità di utilizzo, in uso;

- la figura 7 è una sezione trasversale schematica

di un regolatore di flusso incorporante l'attuatore piezoelettrico di figura 2, in condizione di riposo;

- la figura 8 mostra il regolatore di flusso di figura 7, in una diversa condizione operativa;

- la figura 9 è una sezione trasversale schematica di un diverso regolatore di flusso incorporante l'attuatore piezoelettrico di figura 2, in condizione di riposo;

- la figura 10 mostra il regolatore di flusso di figura 9, in una diversa condizione operativa;

- la figura 11 è una sezione trasversale schematica di un regolatore di flusso incorporante una ulteriore forma di realizzazione del presente attuatore piezoelettrico, in condizione di riposo;

- la figura 12 è una vista prospettica semplificata di un altoparlante incorporante il presente attuatore piezoelettrico; e

- le figure 13A-21A e 13B-21B mostrano sezioni trasversali dell'attuatore piezoelettrico di figura 2, in fasi di fabbricazione successive, prese rispettivamente lungo le linee di sezione XIII A-XIII A e XIII B-XIII B di figura 4.

Qui di seguito viene descritto un attuatore piezoelettrico 50 realizzabile in tecnologia MEMS ("Micro Electro-Mechanical System") a film piezoelettrico sottile.

Come mostrato nelle figure 2-4, l'attuatore

piezoelettrico 50 è formato in un corpo 51 avente una prima faccia 51A e una seconda faccia 51B e comprendente un substrato 57 di materiale semiconduttore, ad esempio silicio, ed uno strato superficiale 58 sovrastante il substrato 57 e ad esempio formato da una pluralità di singoli strati quali uno strato di materiale semiconduttore, ad esempio polisilicio, e almeno uno strato di materiale isolante, quale ortosilicato tetraetile (TEOS).

Una cavità 52, di forma ad esempio cilindrica, si estende all'interno del corpo 51 a partire dalla seconda faccia 51B e lo attraversa completamente. Di conseguenza il substrato 57 e la porzione dello strato superficiale 58 al di sopra di questo formano una cornice 53 circondante una struttura deformabile 54, formata qui dagli stessi materiali che formano lo strato superficiale 58, e sospesa sulla cavità 52.

Lo strato superficiale 58 ha uno spessore molto minore rispetto al substrato 57 e all'estensione orizzontale, parallelamente alla prima faccia 51A del corpo, della struttura deformabile 54.

La struttura deformabile 54 è dunque sostanzialmente planare.

La struttura deformabile 54 ha, in pianta, simmetria ad esempio circolare o poligonale con un elevato numero lati, avente un centro O, e comprende una pluralità di anelli

deformabili 55, fra loro concentrici, e una porzione centrale mobile 56 circondata dagli anelli deformabili 55 ed avente qui, in pianta, sezione circolare.

In particolare, in questa forma di realizzazione, la struttura deformabile 54 è formata da tre anelli deformabili comprendenti un primo, un secondo ed un terzo anello deformabile 55A-55C.

Il primo anello 55A è accoppiato alla cornice 53 tramite una pluralità di prime porzioni di collegamento 60. Ciascuna prima porzione di collegamento 60 è sospesa sulla cavità 52 e si estende tra la cornice 53 e il primo anello deformabile 55A, formando con essi un unico pezzo.

In dettaglio, qui, sono presenti tre prime porzioni di collegamento 60, distanziate reciprocamente di 120° lungo la circonferenza del primo anello deformabile 55A.

Il secondo anello deformabile 55B è disposto internamente rispetto al primo anello deformabile 55A ed è accoppiato al primo anello deformabile 55A tramite una pluralità di seconde porzioni di collegamento 65. Ciascuna seconda porzione di collegamento 65 è sospesa sulla cavità 52 e si estende tra il primo ed il secondo anello deformabile 55A, 55B, formando con essi un unico pezzo.

In dettaglio, qui, sono presenti tre seconde porzioni di collegamento 65, distanziate reciprocamente di 120° lungo la circonferenza del secondo anello deformabile 55B ed

aventi, in questa forma di realizzazione, uno sfasamento ("offset") di 60° rispetto alle prime porzioni di collegamento 60.

Il terzo anello deformabile 55C è disposto internamente rispetto al secondo anello deformabile 55B ed è accoppiato al secondo anello deformabile 55B tramite una pluralità di terze porzioni di collegamento 70. Ciascuna terza porzione di collegamento 70 è sospesa sulla cavità 52 e si estende tra il secondo ed il terzo anello deformabile 55B, 55C, formando con essi un unico pezzo.

In dettaglio, qui, sono presenti tre terze porzioni di collegamento 70, distanziate reciprocamente di 120° lungo la circonferenza del terzo anello deformabile 55C ed aventi, in questa forma di realizzazione, uno sfasamento di 60° rispetto alle seconde porzioni di collegamento 65. In altre parole, le terze porzioni di collegamento 70 hanno sfasamento nullo rispetto alle prime porzioni di collegamento 60 e sono radialmente allineate a queste.

Il terzo anello deformabile 55C è inoltre accoppiato alla porzione centrale mobile 56 tramite una pluralità di quarte porzioni di collegamento 75. Ciascuna quarta porzione di collegamento 75 è sospesa sulla cavità 52 e si estende tra il terzo anello deformabile 55C e la porzione centrale mobile 56, formando con essi un unico pezzo.

In dettaglio, qui, sono presenti tre quarte porzioni di

collegamento 75, distanziate reciprocamente di 120° lungo la circonferenza del terzo anello 55C e aventi, in questa forma di realizzazione, uno sfasamento di 60° rispetto alle terze porzioni di collegamento 70. In altre parole, le quarte porzioni di collegamento 75 hanno sfasamento nullo rispetto alle seconde porzioni di collegamento 65 e sono radialmente allineate a queste.

Il primo, il secondo ed il terzo anello deformabile 55A-55C portano una rispettiva pluralità di strutture di attuazione 80, fra loro uguali, a forma di strisce arcuate, operativamente suddivise in strutture di attuazione di primo e di secondo gruppo ("first and second group actuation structures") 80A, 80B e poste reciprocamente a distanza.

Ciascuna struttura di attuazione 80 (si veda la figura 4A relativamente ad una struttura di attuazione di primo gruppo 80A) è formata da una pila comprendente un elettrodo inferiore di attuazione 81, di materiale conduttivo, ad esempio platino; una regione piezoelettrica di attuazione 82, ad esempio di un materiale ceramico unimorfo avente elevata permittività dielettrica relativa, ad esempio superiore a 100, quale piombo-zirconato di titanio (PZT), BaTiO₃, KNN (niobato di sodio e potassio), PbTiO₂ o PbNb₂O₆; e un elettrodo superiore di attuazione 83, di materiale conduttivo, ad esempio platino, ossido di iridio, ittrio o una lega titanio-tungsteno. La regione piezoelettrica di

attuazione 82 è interposta tra l'elettrodo superiore di attuazione 83 e l'elettrodo inferiore di attuazione 81, in modo da formare una struttura a condensatore.

In dettaglio, qui, l'elettrodo inferiore di attuazione 81 di tutte le strutture di attuazione 80 è formato da una singola regione conduttiva (non visibile in figura 2) che comprende una porzione di collegamento 87 (qui visibile solo in parte) per il collegamento ad una piazzola ("pad") di elettrodo inferiore 88, per il collegamento elettrico con un circuito elettrico esterno di polarizzazione, non mostrato, ad esempio ad un potenziale di riferimento (massa).

Gli elettrodi superiori di attuazione 83 delle strutture di attuazione di primo gruppo 80A sono collegati tramite una prima pista conduttiva di collegamento 89A (qui visibile solo in parte), ad una rispettiva piazzola di elettrodo superiore di primo gruppo 90A, per il collegamento elettrico con il circuito elettrico esterno di polarizzazione.

Gli elettrodi superiori di attuazione 83 delle strutture di attuazione di secondo gruppo 80B sono collegati tramite una seconda pista conduttiva di collegamento 89B (qui visibile solo in parte) ad una rispettiva piazzola di elettrodo superiore di secondo gruppo 90B, per il collegamento elettrico con il circuito elettrico esterno di polarizzazione.

In questa forma di realizzazione, il primo, il secondo e il terzo anello deformabile 55A-55C portano ciascuno sei strutture di attuazione 80. Le strisce arcuate che formano le strutture di attuazione 80 coprono ciascuna un uguale arco di circonferenza e hanno un centro C posto su una linea mediana, qui anch'essa definita da un arco di cerchio e rappresentata con un tratteggio in figura 4. Il centro C di ciascuna struttura di attuazione 80 è equidistante dal centro C di una rispettiva struttura di attuazione 80 adiacente. In altre parole, i centri C delle strutture di attuazione 80 sono distanziati reciprocamente di 60° lungo la circonferenza di un rispettivo anello deformabile 55 e le strutture di attuazione 80 di ciascun anello deformabile 55A-55C hanno lunghezza uguale e sono radialmente allineate alle strutture di attuazione 80 degli anelli deformabili 55A-55C adiacenti.

Le strutture di attuazione di primo e di secondo gruppo 80A, 80B si susseguono alternativamente fra loro in ciascun anello deformabile 55A-55C; in particolare i centri C delle strutture di attuazione di secondo gruppo 80B sono distanziati reciprocamente di 120° lungo la circonferenza di un rispettivo anello deformabile 55, e hanno uno sfasamento di 60° rispetto al centro C di una rispettiva struttura di attuazione di primo gruppo 80A adiacente del medesimo anello deformabile 55.

Inoltre, i centri C delle strutture di attuazione di primo gruppo 80A del primo anello deformabile 55A hanno uno sfasamento di 60° rispetto ai centri C delle strutture di attuazione di primo gruppo 80A del secondo anello deformabile 55B e uno sfasamento nullo rispetto ai centri C delle strutture di attuazione di primo gruppo 80A del terzo anello deformabile 55C (in altre parole, sono radialmente allineati a questi).

Inoltre, gli anelli deformabili 55A-55C portano una pluralità di strutture di irrigidimento 85 (figure 3 e 4), estendentisi dal lato inferiore degli anelli deformabili 55, verso l'interno della cavità 52. Le strutture di irrigidimento 85, una per ogni struttura di attuazione di primo gruppo 80A, si estendono radialmente, ciascuna allineata al centro C della rispettiva struttura di attuazione di primo gruppo 80A, e sul lato inferiore di una rispettiva porzione di collegamento; ciascuna struttura di irrigidimento 85 ha dunque una larghezza, in direzione radiale, pari alla somma della larghezza del rispettivo anello deformabile 55 e di una rispettiva porzione di collegamento.

Le strutture di irrigidimento 85 sono formate di pezzo con una rispettiva porzione di collegamento (come spiegato successivamente in riferimento al procedimento di fabbricazione) e sono dunque con esse solidali.

In pratica, le strutture di irrigidimento 85 e le rispettive porzioni di collegamento lavorano, in uso, come strutture di perno, come successivamente spiegato in dettaglio.

In questa forma di realizzazione, gli anelli deformabili 55A-55C portano ciascuno tre strutture di irrigidimento 85, distanziate reciprocamente di 120° lungo la circonferenza di un rispettivo anello deformabile 55. In dettaglio, relativamente al primo anello deformabile 55A, ciascuna struttura di irrigidimento 85 è solidale ad una rispettiva prima porzione di collegamento 60; relativamente al secondo anello deformabile 55B, ciascuna struttura di irrigidimento 85 è solidale ad una rispettiva seconda porzione di collegamento 65; e relativamente al terzo anello deformabile 55C ciascuna struttura di irrigidimento 85 è solidale ad una rispettiva terza porzione di collegamento 70.

Inoltre, la porzione centrale mobile 56 porta una struttura di otturatore 86 (figure 3 e 4), formata qui nello stesso strato delle strutture di irrigidimento 85, estendentisi inferiormente alla porzione centrale mobile 56 verso l'interno della cavità 52. Qui, la struttura di otturatore 86 ha, in pianta, sezione circolare avente diametro minore o uguale rispetto alla sezione della porzione centrale mobile 56.

La struttura deformabile 54 alloggia inoltre una pluralità di sensori di deformazione, di cui tre sensori di deformazione 91 sono mostrati in figura 2.

I sensori di deformazione 91 sono portati ciascuno da un rispettivo anello deformabile 55 e sono disposti, ciascuno, tra due strutture di attuazione 80 adiacenti. In particolare, in questa forma di realizzazione, gli anelli deformabili 55A-55C portano ciascuno un sensore di deformazione 91.

I sensori di deformazione 91 sono formati ciascuno da una rispettiva pila comprendente un elettrodo inferiore di rilevamento 92, di materiale conduttivo, ad esempio platino, una regione piezoelettrica di rilevamento 93, ad esempio di un materiale avente una bassa permittività elettrica relativa, ad esempio approssimativamente inferiore o uguale a 10, e una perdita di tangente ad esempio inferiore a 0,05, in particolare uguale a 0,002, quale nitruro di alluminio, ossido di zinco o polivinilidenfluoruro (PVDF), qui di nitruro di alluminio, e un elettrodo superiore di rilevamento 94, di materiale conduttivo, ad esempio molibdeno, platino, ossido di iridio o ittrio. La regione piezoelettrica di rilevamento 93 è interposta tra l'elettrodo superiore di rilevamento 94 e l'elettrodo inferiore di rilevamento 92, in modo da formare una struttura a condensatore, come mostrato in figura 2A.

L'elettrodo inferiore di rilevamento 92 di ciascun sensore di deformazione 91 è formato, in questa forma di realizzazione, dalla stessa singola regione conduttiva che forma gli elettrodi inferiori di attuazione 81 di tutte le strutture di attuazione 80. Inoltre, una terza pista conduttiva di collegamento 95, qui mostrata solo in parte, collega gli elettrodi superiori di rilevamento 94 ad una piazzola di rilevamento 96 (figura 2), per il collegamento elettrico con un circuito esterno di misura, non mostrato.

La struttura deformabile 54 può formare, ad esempio, un otturatore di una struttura a valvola normalmente chiusa o normalmente aperta, che viene comandata in apertura o chiusura completa o in modulazione di flusso, come sotto spiegato in dettaglio.

Specificamente, in uso, in assenza di polarizzazione, l'attuatore piezoelettrico 50 si trova nella posizione mostrata nelle figure 2-4, con la superficie superiore della porzione centrale mobile 56 a filo con la prima faccia 51A del corpo 51.

Quando è desiderato che la porzione centrale mobile 56 si sposti in allontanamento dalla o in avvicinamento alla cavità 52, una tensione di polarizzazione è applicata selettivamente tra gli elettrodi superiori e gli elettrodi inferiore 83, 81 delle strutture di attuazione 80, come spiegato sotto. In particolare, la tensione di

polarizzazione provoca una deformazione delle regioni piezoelettriche di attuazione 82, come mostrato ad esempio in figura 4B per una struttura di attuazione di primo gruppo 80A. Infatti, indipendentemente dalla polarità della tensione di polarizzazione, la regione piezoelettrica di attuazione 82 è sottoposta ad una medesima deformazione ad imbarcatura, in cui una porzione centrale della struttura di attuazione 80 si abbassa rispetto alle porzioni laterali della medesima struttura di attuazione 80.

Tuttavia, la diversa posizione delle strutture di attuazione di primo gruppo 80A, le cui porzioni centrali sono vincolate dalle prime, seconde e terze porzioni di collegamento 60, 65 e 70 e dalle strutture di irrigidimento 85, rispetto alle strutture di attuazione di secondo gruppo 80B, determinano una diversa deformazione degli anelli deformabili 55 a seconda che vengano polarizzate le strutture di attuazione di primo gruppo 80A o le strutture di attuazione di secondo gruppo 80B, come sotto descritto in dettaglio.

In figura 5, una tensione di polarizzazione V1, in particolare una tensione di polarizzazione unipolare positiva, ad esempio di 40 V, è applicata alle strutture di attuazione di primo gruppo 80A, mentre le strutture di attuazione di secondo gruppo 80B non sono polarizzate ($V2 = 0$ V).

In questa condizione di polarizzazione, ciascuna struttura di attuazione di primo gruppo 80A si deforma approssimativamente come mostrato in figura 4B per il primo anello deformabile 55A.

Come si nota, nel primo anello deformabile 55A, le porzioni centrali delle strutture di attuazione di primo gruppo 80A sono vincolate alla cornice 53 tramite le prime porzioni di collegamento 60 e rispettive strutture di irrigidimento 85, dunque rimangono pressoché indeformate; viceversa, le porzioni di estremità delle strutture di attuazione di primo gruppo 80A sono sollevate verso l'alto.

Il sollevamento delle porzioni di estremità delle strutture di attuazione di primo gruppo 80A provoca anche il sollevamento delle adiacenti strutture di attuazione di secondo gruppo 80B del primo anello deformabile 55A.

Inoltre, dato che le porzioni centrali delle strutture di attuazione di primo gruppo 80A del secondo anello deformabile 55B sono vincolate alle porzioni centrali delle strutture di attuazione di secondo gruppo 80B del primo anello deformabile 55A (tramite le seconde porzioni di collegamento 65 e rispettive strutture di irrigidimento 85), esse sono sollevate, sollevando, già per questo motivo, gli anelli deformabili interni (secondo e terzo anello deformabile 55B, 55C). Inoltre, le strutture di attuazione di primo gruppo 80A del secondo anello deformabile 55B si

deformano analogamente a quanto sopra descritto, provocando un ulteriore innalzamento delle strutture di attuazione di secondo gruppo 80B del secondo anello deformabile 55B e quindi del terzo anello 55C.

Analogamente, le strutture di attuazione di primo gruppo 80A del terzo anello deformabile 55C si deformano e provocano un ulteriore innalzamento delle strutture di attuazione di secondo gruppo 80B del terzo anello deformabile 55C e quindi della porzione centrale mobile 56, come mostrato in figura 5, in cui l'attuatore piezoelettrico 50 è rappresentato in scala di grigi, e le porzioni più scure sono quelle maggiormente deformate rispetto alla posizione di riposo.

In figura 6, la tensione di polarizzazione, in particolare unipolare positiva come detto precedentemente, è applicata alle strutture di attuazione di secondo gruppo 80B. Anche qui, l'attuatore piezoelettrico 50 è rappresentato in scala di grigi, in cui una tonalità più scura corrisponde ad una maggiore deformazione rispetto alla posizione di riposo.

In questo caso, le strutture di attuazione di secondo gruppo 80B del primo anello deformabile 55A si deformano, come mostrato in figura 4B, e provocano uno spostamento delle proprie porzioni centrali verso il basso, verso l'interno della cavità 52, rispetto alle proprie porzioni di estremità,

le quali sono invece vincolate alle strutture di attuazione di primo gruppo 80A adiacenti, che non si deformano dato che non sono polarizzate e sono a loro volta vincolate alla cornice 53 tramite le prime porzioni di collegamento 60 e le rispettive strutture di irrigidimento 85.

Le strutture di attuazione di primo gruppo 80A del secondo anello deformabile 55B, non essendo polarizzate ed essendo vincolate alle strutture di attuazione di secondo gruppo 80B del primo anello deformabile 55A (tramite le seconde porzioni di collegamento 65 e rispettive strutture di irrigidimento 85), si spostano anch'esse verso il basso (verso l'interno della cavità 52). Inoltre, la deformazione delle strutture di attuazione di secondo gruppo 80B del secondo anello deformabile 55B provoca un ulteriore spostamento verso l'interno della cavità 52 delle rispettive porzioni di estremità e quindi del terzo anello deformabile 55C.

Analogamente, la deformazione delle strutture di attuazione di secondo gruppo 80B del terzo anello deformabile 55C provoca un ulteriore abbassamento della porzione centrale mobile 56 verso l'interno della cavità 52.

In pratica, la struttura deformabile 54 permette un'elevata traslazione della porzione centrale mobile 56 rispetto alla posizione di riposo, maggiore della deformazione di ciascun anello deformabile 55 causata dalle

rispettive strutture di attuazione 80, sia verso l'interno della cavità 52, sia in allontanamento dalla cavità 52. L'elevato spostamento può essere ottenuto applicando basse tensioni di polarizzazione.

La massima deformazione della struttura deformabile 54 dipende da molteplici fattori tra cui numero di anelli deformabili 55, spessore e diametro della struttura deformabile 54 e della porzione centrale mobile 56, spessore delle strutture di irrigidimento 85 e della struttura di otturatore 86 e massima tensione applicabile; tali fattori sono parametri che possono essere modificati in fase di progettazione a seconda di un'applicazione specifica.

Ad esempio, in simulazioni eseguite dalla Richiedente, è stato verificato che la porzione centrale mobile può traslare fino a 80 μm (40 μm in ciascuna delle due direzioni) a fronte di una tensione di polarizzazione di 40 V.

La deformazione della struttura deformabile 54 è tale da permettere uno spostamento verticale della porzione centrale mobile 56, mantenendo la struttura di otturatore 86 parallela rispetto alla posizione di riposo, caratteristica utile in applicazioni specifiche.

Inoltre, con riferimento nuovamente alla figura 2, in uso, la deformazione della struttura deformabile 54 genera uno stress meccanico negli anelli deformabili 55. Lo stress meccanico genera, nella regione piezoelettrica di

rilevamento 93, una tensione di rilevamento tra l'elettrodo inferiore di rilevamento 92 e l'elettrodo superiore di rilevamento 94 di ciascun sensore di deformazione 91 (figura 2A). La tensione di rilevamento può essere misurata e convertita dal circuito di misura (mostrato ad esempio in figura 7) in un valore di deformazione della struttura deformabile 54 e quindi di un valore di spostamento della porzione centrale mobile 56 rispetto alla posizione di riposo, in modo di per sé noto.

La misura della tensione di rilevamento permette quindi di controllare, tramite un sistema di controllo ad anello chiuso e in tempo reale, lo stato dell'attuatore piezoelettrico 50.

Inoltre, le dimensioni dell'attuatore piezoelettrico 50 sono notevolmente ridotte, dal momento che sia le strutture di attuazione 80 sia i sensori di deformazione 91 sono integrati in una stessa piastrina ("die").

Inoltre, dato che i sensori di deformazione 91 sono di tipo piezoelettrico, la misura della tensione di rilevamento è una rilevazione passiva, ovvero non implica un passaggio di corrente, rendendo l'attuatore piezoelettrico 50 efficiente dal punto di vista energetico.

L'attuatore piezoelettrico 50 può essere integrato in un regolatore di flusso 200, come mostrato in figura 7. Il regolatore di flusso 200 comprende, oltre all'attuatore

piezoelettrico 50, un corpo 205 e un canale fluidico 210, avente una porzione di ingresso 210A e una porzione di uscita 210B.

Il corpo 205 è di materiale semiconduttore, ad esempio silicio, ed è formato da una porzione orizzontale 206, una sporgenza tubolare 207 estendentesi trasversalmente dalla porzione orizzontale 206, trasversalmente ad essa, e un'apertura passante 208, avente un'imboccatura che forma la porzione di ingresso 210A del canale fluidico 210 e attraversante la sporgenza tubolare 207.

La porzione orizzontale 206 del corpo 205 è incollata al substrato 57 dell'attuatore piezoelettrico 50 tramite una regione di incollaggio 215, in modo che la porzione orizzontale 206 del corpo 205 sia affacciata alla cavità 52 e la sporgenza tubolare 207 sia allineata alla struttura di otturatore 86. In particolare, in questa forma di realizzazione, l'altezza della sporgenza tubolare 207 è tale per cui, a riposo, la struttura di otturatore 86 è a contatto con un'estremità della sporgenza tubolare 207.

In aggiunta, il regolatore di flusso 200 comprende un'unità di controllo 220 accoppiata all'attuatore piezoelettrico 50, in particolare alle strutture di attuazione 80 e ai sensori di deformazione 91, attraverso le piazzole di contatto 88, 90A, 90B e 96 di figura 2 (come mostrato schematicamente in figura 7), per lo scambio dei

segnali e delle grandezze elettriche utilizzate per il controllo del regolatore di flusso 200 stesso.

A tale scopo, l'unità di controllo 220 comprende porte di ingresso/uscita 221, 222 per il ricevimento di segnali di comando e l'invio di segnali di rilevamento verso l'esterno (ad esempio verso un utente), uno stadio di comando 223 (ad esempio una CPU) per l'elaborazione dei segnali previsti per il controllo, ed uno stadio di pilotaggio 224, per il comando del regolatore di flusso 200. Lo stadio di comando 223 può ad esempio memorizzare tavole di conversione fra valori nominali di flusso (desiderato) e il corrispondente valore di tensione di polarizzazione (di attuazione) da fornire all'attuatore piezoelettrico 50.

In uso, un utente può impostare, attraverso le porte di ingresso 221, il valore nominale di flusso di un fluido all'interno del canale fluidico 210. In base alle tavole memorizzate, l'unità di controllo 220 applica una tensione di polarizzazione di valore opportuno alle strutture di attuazione di primo gruppo 80A. Come spiegato precedentemente e come mostrato in figura 8, la struttura deformabile 54 si deforma e la porzione centrale mobile 56 (che costituisce quindi qui un elemento a tappo) allontana la struttura di otturatore 86 dall'estremità della sporgenza tubolare 207, creando così un passaggio 230 del canale fluidico 210 e distanziando reciprocamente gli anelli

deformabili 55 e la porzione centrale mobile 56 che costituiscono quindi la porzione di uscita 210B del canale fluidico 210. Nella posizione deformata di figura 8, quindi, il passaggio 230 collega la porta di ingresso 210A alla porzione di uscita 210B attraverso l'apertura passante 208 e consente quindi il flusso di un liquido o un gas alimentato alla porzione di ingresso 210A.

Parallelamente, e come spiegato precedentemente, i sensori di deformazione 91 (qui non mostrati), rilevano lo stress generato dalla deformazione della struttura deformabile 54 e forniscono una corrispondente tensione di rilevamento all'unità di controllo 220.

L'unità di controllo 220 può quindi confrontare il valore della tensione di rilevamento, o grandezze ad essa correlate, con opportuni parametri di calibrazione corrispondenti ad un valore di flusso e verificare, in tempo reale, che il flusso del fluido sia conforme al valore nominale. In caso negativo, l'unità di controllo 220 può modificare la tensione di polarizzazione in modo da rendere il flusso conforme al valore nominale.

Le figure 9 e 10 mostrano un'altra forma di realizzazione di un regolatore di flusso, qui indicato con 250, analogo al regolatore di flusso 200, pertanto elementi comuni saranno identificati con uno stesso numero.

In dettaglio, il regolatore di flusso 250 comprende

l'attuatore piezoelettrico 50, un corpo 255 e un canale fluidico 260, avente una porzione di ingresso 260A e una porzione di uscita 260B. Differentemente dal regolatore di flusso 200 di figura 7, l'altezza della sporgenza tubolare 207 è tale per cui, a riposo, la sua estremità si estende a distanza dalla struttura di otturatore 86 e il canale fluidico 260 del regolatore di flusso 250 forma, a riposo, un passaggio 265 delimitato dalla struttura di otturatore 86 e dalla sporgenza tubolare 207.

In questo modo, in assenza di una tensione di polarizzazione, il fluido può scorrere tra la porzione di ingresso 260A e la porzione di uscita 260B del canale fluidico 260.

In uso, quando è desiderato modificare o bloccare il flusso attraverso il canale fluidico 260, una tensione di polarizzazione viene applicata alle strutture di attuazione 80 per impostare un valore di flusso nominale. In questa forma di realizzazione, la tensione di polarizzazione viene applicata alle strutture di attuazione di secondo gruppo 80B, provocando uno spostamento della struttura deformabile 54 verso il basso, e l'avvicinamento della struttura di otturatore 86 alla sporgenza tubolare 207, come mostrato in figura 10. In questo modo, si ha una diminuzione della sezione del passaggio 265, e quindi del flusso, che può essere anche completamente interrotto nel caso di completa

chiusura del passaggio 265.

La figura 11 mostra un regolatore di flusso 270 incorporante il presente attuatore piezoelettrico secondo un'ulteriore forma di realizzazione, in seguito indicato come attuatore piezoelettrico 280. Il regolatore di flusso 270 e l'attuatore piezoelettrico 280 hanno struttura analoga, rispettivamente, al regolatore di flusso 250 e all'attuatore piezoelettrico 50, quindi elementi in comune sono identificati dagli stessi numeri di riferimento.

In particolare, qui, la porzione centrale mobile 56 si affaccia direttamente alla sporgenza tubolare 207 ed è, a riposo, a distanza dalla sporgenza tubolare 207, formando un passaggio 285. In uso, la tensione di polarizzazione può avvicinare o allontanare la porzione centrale mobile 56 dalla sporgenza tubolare 207, modificando la sezione del passaggio 285, come spiegato in precedenza. In pratica, qui, il passaggio 285 è delimitato dalla sporgenza tubolare 207 e dalla porzione centrale mobile 56 e non è presente la struttura di otturatore 86.

Secondo un'altra forma di realizzazione, l'attuatore piezoelettrico 50, 280 può essere integrato in un altoparlante.

In particolare, in figura 12, un altoparlante 300 comprende l'attuatore piezoelettrico 50. Risulta tuttavia evidente al tecnico del ramo che anche l'attuatore

piezoelettrico 280 può essere integrato in maniera analoga nell'altoparlante 300.

L'altoparlante 300 comprende un telaio 303 delimitante una cavità 305; un supporto 307, fissato al telaio 303; e un diaframma 306, portato dal supporto 307 e sospeso sulla cavità 305.

Il telaio 303 è approssimativamente un guscio semisferico o a forma di cupola; il supporto 307 e il diaframma 306 chiudono posteriormente il telaio.

L'altoparlante 303 comprende inoltre l'attuatore 50 e un'unità di controllo 320, disposti all'interno della cavità 305. Alternativamente, l'unità di controllo 320 può essere realizzata esternamente al telaio 303.

L'unità di controllo 320 è accoppiata all'attuatore piezoelettrico 50, in particolare alle strutture di attuazione 80, come già descritto ad esempio con riferimento alla figura 7.

La porzione centrale mobile 56 e la struttura di otturatore 86 dell'attuatore piezoelettrico 50 sono accoppiate meccanicamente al diaframma 306, ad esempio sono incollate.

In uso, l'unità di controllo 320 applica una tensione di polarizzazione, di frequenza opportuna, alle strutture di attuazione di primo e/o di secondo gruppo 80A, 80B, provocando uno spostamento della porzione centrale mobile 56

(come descritto precedentemente) e quindi una deformazione del diaframma 306, che quindi oscilla avanti e indietro (ovvero verso l'interno e l'esterno della cavità 305) rispetto ad un piano perpendicolare al piano del disegno. La deformazione del diaframma 306 genera quindi un'onda acustica che può propagarsi esternamente all'altoparlante 300.

L'altoparlante 300 può quindi essere realizzato con dimensioni ridotte e presenta elevata efficienza energetica, grazie alle caratteristiche dell'attuatore piezoelettrico 50 descritte precedentemente.

Qui di seguito vengono descritte fasi di fabbricazione che portano alla realizzazione dell'attuatore MEMS piezoelettrico 50 mostrato in figura 2.

In particolare, nelle figure 13A-21A viene mostrato il procedimento di fabbricazione dell'attuatore MEMS piezoelettrico 50 in corrispondenza di una struttura di attuazione 80, di un sensore di deformazione 91 e, parzialmente, della struttura deformabile 54 in una sezione trasversale circonferenziale presa lungo un anello deformabile 55; nelle figure 13B-21B viene mostrato il procedimento di fabbricazione dell'attuatore MEMS piezoelettrico 50 in corrispondenza delle strutture di attuazione 80 e, parzialmente, della struttura deformabile 54 e della cornice 53 in una sezione trasversale radiale

presa attraverso diversi anelli deformabili adiacenti.

Le figure 13A e 13B mostrano una fetta ("wafer") 400, già sottoposta a prime fasi di lavorazione. In dettaglio la fetta 400 comprende un substrato di lavoro 405 di materiale semiconduttore, ad esempio silicio, avente una prima e una seconda superficie 405A, 405B, disposte rispettivamente su di un lato anteriore e un lato posteriore della fetta 400. Sulla prima superficie 405A del substrato di lavoro 405 si estende un primo strato di sagomatura 406, ad esempio di ortosilicato tetraetile (TEOS) depositato, avente ad esempio uno spessore di almeno 1 μm , qui di 1 μm .

Successivamente, figure 14A e 14B, il primo strato di sagomatura 406 viene definito ("patterned") tramite attacco chimico selettivo in modo da formare una pluralità di prime regioni di sagomatura inferiore 407 e una seconda regione di sagomatura inferiore 408, dove si desidera formare successivamente, rispettivamente, la pluralità di strutture di irrigidimento 85 e la struttura di otturatore 86, come descritto in dettaglio in seguito.

Inoltre, uno strato di irrigidimento 409 di materiale semiconduttore, ad esempio polisilicio, viene realizzato, ad esempio cresciuto epitassialmente, sulla prima superficie 405A del substrato di lavoro 405, sulla pluralità di prime regioni di sagomatura inferiore 407 e sulla seconda regione di sagomatura inferiore 408; lo strato di irrigidimento 409

viene quindi sottoposto a levigatura chimico-meccanica (CMP, "chemical-mechanical polishing"), in modo da realizzare una superficie superiore piana. Lo strato di irrigidimento 409 ha uno spessore maggiore del primo strato di sagomatura 406, in questa forma di realizzazione di ad esempio 25 μm .

Successivamente, un primo strato isolante 410, ad esempio di ortosilicato tetraetile (TEOS) e avente qui uno spessore comparabile con quello del primo strato di sagomatura 406, ad esempio qui di 1 μm , è depositato sullo strato di irrigidimento 409.

Nelle figure 15A e 15B, uno strato strutturale 411, di materiale semiconduttore quale polisilicio, è depositato sopra il primo strato isolante 410. Lo strato strutturale 411 ha uno spessore scelto in base alle caratteristiche meccaniche desiderate, ad esempio, in questa forma di realizzazione, esso presenta uno spessore di 10 μm .

Un secondo strato isolante 412, ad esempio di ortosilicato tetraetile (TEOS) e avente qui uno spessore di ad esempio 0,5 μm , è depositato sopra lo strato strutturale 411.

In seguito, figure 16A e 16B, un primo strato conduttivo 420, ad esempio di platino, è depositato sopra il secondo strato isolante 412; uno strato di attuazione 421 di materiale piezoelettrico unimorfo avente elevata permittività dielettrica relativa, ad esempio superiore a

100, quale piombo-zirconato di titanio (PZT), BaTiO_3 , KNN (niobato di sodio e potassio), PbTiO_2 o PbNb_2O_6 , è depositato sopra il primo strato conduttivo 420 per uno spessore compreso tra 1 μm e 3 μm , in particolare ad esempio di 2 μm ; un secondo strato conduttivo 422, ad esempio di una lega tungsteno-titanio, di platino, ittrio o ossido di iridio, è depositato sopra lo strato di attuazione 421, formando una pila di strati.

La pila di strati così ottenuta è definita mediante passaggi litografici e di attacco chimico selettivo, noti al tecnico del ramo, in modo che il primo strato conduttivo 420 formi una regione di elettrodo inferiore 415, lo strato di attuazione 421 formi una pluralità di prime regioni piezoelettriche 416 e il secondo strato conduttivo 422 formi una pluralità di regioni di elettrodo superiore 417.

In particolare, la pluralità di regioni di elettrodo superiore 417 e la pluralità di prime regioni piezoelettriche 416 vengono definite in una prima fase di attacco e presentano quindi stessa forma; la regione di elettrodo inferiore 415 viene definita in una separata fase di attacco, ad esempio dopo la definizione della pluralità di regioni di elettrodo superiore 417 e di prime regioni piezoelettriche 416, e comprende una pluralità di porzioni di attuazione 415A, una pluralità di porzioni di rilevamento 415B (una sola porzione di rilevamento è visibile in figura 16A) e una

pluralità di porzioni di collegamento elettrico 415C. In dettaglio, ciascuna della pluralità di porzioni di attuazione 415A è approssimativamente sottostante rispettive regioni di elettrodo superiore 417 e prime regioni piezoelettriche 416; ciascuna porzione di rilevamento 415B si estende lateralmente, su di un solo lato, in particolare a destra in figura 16A, rispetto alla pluralità di regioni di elettrodo superiore 417 e di prime regioni piezoelettriche 416; e ciascuna porzione di collegamento elettrico 415C si estende lateralmente, in particolare su entrambi i lati in figura 16A, rispetto alla pluralità di regioni di elettrodo superiore 417 e di prime regioni piezoelettriche 416.

Ciascuna porzione di attuazione 415A della regione di elettrodo inferiore 415, ciascuna prima regione piezoelettrica 416 e ciascuna regione di elettrodo superiore 417 forma, rispettivamente, l'elettrodo inferiore di attuazione 81, la regione piezoelettrica di attuazione 82 e l'elettrodo superiore di attuazione 83 di ciascuna struttura di attuazione 80.

In particolare, nelle figure 16A e 16B, è mostrata una struttura di attuazione di primo gruppo 80A (in corrispondenza di una rispettiva prima regione di sagomatura inferiore 407) e in figura 16B sono mostrate due strutture di attuazione di secondo gruppo 80B adiacenti, in direzione radiale dell'attuatore 50 di figura 4, alla struttura di

attuazione di primo gruppo 80A.

Successivamente, figure 17A e 17B, uno strato piezoelettrico 423, ad esempio di nitruro di alluminio (AlN) e avente uno spessore compreso tra 0,5 e 3 μm , in particolare di 1 μm , è depositato sul lato anteriore della fetta 400 e definito, tramite litografia ed attacco chimico selettivo, in modo da formare una pluralità di seconde regioni piezoelettriche 430 (una sola visibile in figura 17A) e una pluralità di regioni di passivazione 431.

Le regioni di passivazione 431 circondano ciascuna una rispettiva struttura di attuazione 80, si estendono su parte della porzione di collegamento elettrico 415C della regione di elettrodo inferiore 415 (figura 17A) e su parte del secondo strato isolante 412 (figura 17B) e formano una pluralità di prime aperture 432 sovrastanti ciascuna una rispettiva regione di elettrodo superiore 417.

Le seconde regioni piezoelettriche 430 si estendono ciascuna al di sopra di rispettive porzioni di rilevamento 415B della regione di elettrodo inferiore 415, a distanza da una rispettiva regione di passivazione 431.

Successivamente, figure 18A e 18B, un terzo strato conduttivo 424, ad esempio di molibdeno, platino, ittrio o ossido di iridio, è depositato al di sopra della fetta 400 (dal lato anteriore della fetta 400) e definito, in modo da formare una prima, una seconda e una terza regione conduttriva

di collegamento 435-437 e una regione di elettrodo superiore di rilevamento 438, come spiegato qui di seguito.

In dettaglio, la prima e la seconda regione conduttriva di collegamento 435, 436 si estendono sopra la struttura di attuazione di primo e, rispettivamente, di secondo gruppo 80A, 80B, all'interno della pluralità di prime aperture 432, in contatto con una rispettiva regione di elettrodo superiore 417, e sopra una rispettiva regione di passivazione 431.

Inoltre, in questa forma di realizzazione, porzioni della prima e della seconda regione conduttriva di collegamento 435, 436 si estendono a lato di ciascuna struttura di attuazione 80 (figura 18B), sopra il secondo strato isolante 412, formando rispettivamente la prima e la seconda pista conduttriva 89A, 89B dell'attuatore piezoelettrico 50 (figura 2). In particolare, la prima regione conduttriva di collegamento 435 collega le strutture di attuazione di primo gruppo 80A fra loro e alla piazzola di elettrodo superiore del primo gruppo 90A, e la seconda regione conduttriva di collegamento 436 collega le strutture di attuazione di secondo gruppo 80B fra loro e alla piazzola di elettrodo superiore del secondo gruppo 90B dell'attuatore piezoelettrico 50.

La regione di elettrodo superiore di rilevamento 438 si estende sopra ciascuna seconda regione piezoelettrica 430 ed è in contatto elettrico diretto con la terza regione

conduttiva di collegamento 437, corrispondente alla terza pista conduttiva 95 di figura 2 ed estendentisi sopra il secondo strato isolante 412, per il collegamento elettrico alle rispettive piazze di rilevamento 96 mostrate in figura 2.

In pratica, ciascuna porzione di rilevamento 415B della regione di elettrodo inferiore 415, ciascuna seconda regione piezoelettrica 430 e ciascuna regione di elettrodo superiore di rilevamento 438 formano, rispettivamente, l'elettrodo inferiore di rilevamento 92, la regione piezoelettrica di rilevamento 93 e l'elettrodo superiore di rilevamento 94 di ciascun sensore di deformazione 91 (qui, come indicato sopra, uno per anello deformabile 55).

Successivamente, figure 19A e 19B, la fetta 400 viene sottoposta ad attacchi chimici selettivi, dal lato anteriore, in modo da creare trincee 445 che attraversano il secondo strato isolante 412 e lo strato strutturale 411. In particolare, in figura 19B, sono visibili due trincee 445, che si estendono a sinistra della struttura di attuazione di primo gruppo 80A, tra la struttura di attuazione di primo e di secondo gruppo 80A, 80B e a destra della struttura di attuazione di secondo gruppo 80B.

In dettaglio, le trincee 445 sono utili per la separazione degli anelli deformabili 55 fra loro e dalla porzione centrale mobile 56 (figura 2), come spiegato in

seguito.

Inoltre, ancora in riferimento alle figure 19A e 19B, un secondo strato di sagomatura 450 viene depositato sulla seconda superficie 405B del substrato di lavoro 405 e definito litograficamente in modo da formare una finestra 451 sul lato posteriore ("back") della fetta 400, al di sotto delle strutture di attuazione 80, dei sensori di deformazione 91 e della seconda regione di sagomatura inferiore 408.

Successivamente, figure 20A e 20B, la fetta 400 viene attaccata selettivamente, ad esempio mediante un attacco chimico secco, a partire dalla seconda superficie 405B del substrato di lavoro 405, rimuovendo il materiale semiconduttore di questo in corrispondenza della finestra 451. Inoltre, vengono rimosse porzioni dello strato di irrigidimento 409 non coperte dalla prima e dalla pluralità di seconde regioni di sagomatura inferiore 407, 408. Si forma così una cavità di lavoro 452, corrispondente alla cavità 52 dell'attuatore piezoelettrico 50. Del substrato di lavoro 405 rimane quindi una porzione portante 405', corrispondente al substrato 57 dell'attuatore piezoelettrico 50, e dello strato di irrigidimento 409 rimangono una porzione centrale 409' e una pluralità di porzioni di connessione 409".

Utilizzando ancora il secondo strato di sagomatura 450 come maschera di attacco, vengono poi rimosse la prima e le seconde regioni di sagomatura inferiore 407, 408 e porzioni

del primo strato isolante 410 ai lati della porzione centrale e della pluralità di porzioni di connessione 409', 409" dello strato di irrigidimento 409. In questo modo, le trincee 445 diventano passanti, figura 21B.

Il secondo strato di sagomatura 450 è quindi rimosso.

Come mostrato nelle figure 21A e 21B, la porzione centrale 409' dello strato di irrigidimento 409 e la porzione rimanente (indicata con 410') del primo strato isolante 410 formano la struttura di otturatore 86; la pluralità di porzioni di connessione 409" dello strato di irrigidimento 409 e le porzioni rimanenti (indicate con 410") del primo strato isolante 410 formano le strutture di irrigidimento 85. Inoltre, lo strato strutturale 411 e il secondo strato isolante 412, ai lati della cavità di lavoro 452, formano, insieme alla porzione portante 405' del substrato 405, la cornice 53 e, al di sopra della cavità di lavoro 452, formano le porzioni di collegamento 60, 65, 70, 75, la porzione centrale mobile 56 e gli anelli deformabili 55A-55C, identificati con un tratteggio in figura 21B.

Infine, la fetta 400 viene tagliata ("diced") e ciascuna piastrina, dopo usuali fasi di connessione elettrica e incapsulamento, forma l'attuatore piezoelettrico 50 mostrato in figura 2.

Nel procedimento descritto, la regione di passivazione 431 viene realizzata ad esempio di nitruro di alluminio.

Infatti, il nitruro di alluminio ha ottime proprietà di isolamento elettrico ed è chimicamente stabile fino a temperature elevate (anche fino a 1077°C) anche in ambiente ossidante quale aria e umidità. Di conseguenza, la realizzazione della regione di passivazione 431 permette la passivazione dell'attuatore piezoelettrico 50 tramite deposito e definizione di un solo strato di materiale, riducendo quindi i passaggi di fabbricazione e i costi di fabbricazione dell'attuatore piezoelettrico 50 stesso.

Risulta infine chiaro che all'attuatore piezoelettrico 50, 280 e al procedimento di fabbricazione qui descritti ed illustrati possono essere apportate modifiche e varianti senza per questo uscire dall'ambito protettivo della presente invenzione, come definito nelle rivendicazioni allegate.

Ad esempio, il procedimento di fabbricazione qui descritto può essere adattato, in maniera evidente al tecnico del ramo, per la fabbricazione dell'attuatore piezoelettrico 280, ad esempio realizzando, a partire dal primo strato di sagomatura 406, solamente la regione di sagomatura inferiore utile per ottenere le strutture di irrigidimento 85.

Ovviamente, il numero di anelli deformabili, di strutture di attuazione e di sensori di deformazione può essere modificato in base alla specifica applicazione.

Inoltre, i sensori di deformazione possono essere

disposti su di uno o più anelli deformabili.

Gli strati formanti la struttura deformabile 54 possono avere spessori differenti, a seconda della deformazione e dell'applicazione desiderata.

Inoltre, il canale fluidico può avere forma differente.

Ad esempio, il circuito elettrico di polarizzazione e di misura possono essere realizzati nella stessa piastrina dell'attuatore piezoelettrico.

L'unità di controllo 220, 320 può essere integrata nell'attuatore piezoelettrico 50, 280 o nel corpo 205, oppure essere costituita da un dispositivo a sé, ad esempio un ASIC.

Inoltre, l'elettrodo inferiore di attuazione e l'elettrodo inferiore di rilevamento possono essere formate da regioni conduttrive distinte.

RIVENDICAZIONI

1. Attuatore MEMS (50; 280) comprendente:

- un corpo (51) circondante una cavità (52);
- una struttura deformabile (54) sospesa sulla cavità e comprendente una porzione mobile (56) e una pluralità di elementi deformabili (55), disposti consecutivamente uno all'altro, colleganti la porzione mobile al corpo e soggetti ciascuno ad una deformazione; e
 - almeno una pluralità di strutture di attuazione (80A, 80B) portate dagli elementi deformabili (55) e configurate per provocare una traslazione della porzione mobile maggiore della deformazione di ciascun elemento deformabile (55), le strutture di attuazione comprendendo ciascuna una rispettiva prima regione piezoelettrica (82).

2. Attuatore secondo la rivendicazione precedente, in cui la struttura deformabile (54) è monolitica, sostanzialmente planare, e comprende uno strato di materiale semiconduttore (411), e in cui la porzione mobile (56) e gli elementi deformabili (55) sono strutture adiacenti, aventi, a riposo, superfici superiori giacenti in un piano.

3. Attuatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui:

gli elementi deformabili (55) hanno forma generalmente anulare e circondano la porzione mobile (56);
l'almeno una pluralità di strutture di attuazione è una

prima pluralità di strutture di attuazione (80A), la prima pluralità di strutture di attuazione essendo configurata per deformare la struttura deformabile (54) e spostare la porzione mobile (56) in una prima direzione;

l'attuatore comprende inoltre una seconda pluralità di strutture di attuazione (80B), le strutture di attuazione della seconda pluralità di strutture di attuazione comprendendo ciascuna una rispettiva regione piezoelettrica uguale alla prima regione piezoelettrica (83), la seconda pluralità di strutture di attuazione essendo configurata per deformare la struttura deformabile (54) e spostare la porzione mobile (56) in una seconda direzione.

4. Attuatore secondo la rivendicazione precedente, in cui le strutture di attuazione della prima e della seconda pluralità di strutture di attuazione (80A, 80B) si susseguono alternativamente fra loro in ciascun elemento deformabile (55) e in cui la struttura deformabile (54) comprende una pluralità di bracci (60, 65, 70, 75); primi bracci (60) della pluralità di bracci estendendosi tra il corpo (51) e la pluralità di elementi deformabili; secondi bracci (65, 70) della pluralità di bracci estendendosi fra elementi deformabili adiacenti della pluralità di elementi deformabili; e terzi bracci (75) della pluralità di bracci estendendosi tra la pluralità di elementi deformabili e la porzione mobile (56), in cui i secondi bracci (65, 70)

accoppiano le strutture di attuazione della prima pluralità di strutture di attuazione sugli elementi deformabili a strutture di attuazione della seconda pluralità di strutture di attuazione sugli elementi deformabili adiacenti.

5. Attuatore secondo la rivendicazione precedente, in cui la struttura deformabile comprende inoltre una pluralità di strutture di irrigidimento (85), le strutture di irrigidimento essendo portate dagli elementi deformabili (55) su un lato opposto rispetto alle strutture di attuazione della prima pluralità di strutture di attuazione (80A), le strutture di irrigidimento essendo ciascuna disposta in corrispondenza di una porzione centrale di una rispettiva struttura di attuazione della prima pluralità di strutture di attuazione (80A) ed essendo solidale ad un rispettivo braccio della pluralità di bracci.

6. Attuatore secondo la rivendicazione 4 o 5, in cui la pluralità di elementi deformabili (55) comprende una pluralità di anelli concentrici, le strutture di attuazione della prima e della seconda pluralità di strutture di attuazione (80A, 80B) sono formate da strisce piezoelettriche estendentisi anularmente e a distanza reciproca uniforme su ciascun elemento deformabile, ciascuna striscia piezoelettrica definendo una linea mediana arcuata avente un centro (C), in cui ciascun braccio (60, 65, 70, 75) è radialmente allineato al centro di una struttura di

attuazione della seconda pluralità di strutture di attuazione (80B) posta su un primo elemento deformabile della pluralità di elementi deformabili (55) e al centro di una struttura di attuazione della prima pluralità di strutture di attuazione (80A) posta su un secondo elemento deformabile della pluralità di elementi deformabili, il secondo elemento deformabile essendo adiacente e interno al primo elemento deformabile.

7. Attuatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui la porzione mobile (56) è formata da una piattaforma e la struttura deformabile (54) comprende una struttura di otturatore (86) formata da una regione sporgente dalla porzione mobile (56).

8. Attuatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente almeno una struttura di rilevamento (91) portata dalla struttura deformabile (54) e configurata per rilevare la deformazione della struttura deformabile, ciascuna struttura di rilevamento comprendendo una rispettiva seconda regione piezoelettrica (93).

9. Attuatore secondo la rivendicazione precedente, in cui le strutture di attuazione dell'almeno una pluralità di strutture di attuazione (80A, 80B) comprendono ciascuna una rispettiva prima pila di regioni includente un elettrodo inferiore di attuazione (81), la prima regione piezoelettrica (82) e un elettrodo superiore di attuazione

(83) e l'almeno una struttura di rilevamento (91) comprende una rispettiva seconda pila di regioni includente un elettrodo inferiore di rilevamento (92), la seconda regione piezoelettrica (93) e un elettrodo superiore di rilevamento (94), in cui l'elettrodo inferiore di rilevamento (92) di ciascuna struttura di rilevamento (91) e l'elettrodo inferiore di attuazione (81) di ciascuna struttura di attuazione sono formati da una singola regione conduttiva.

10. Attuatore secondo la rivendicazione precedente, comprendente inoltre una pluralità di regioni di passivazione (431), le regioni di passivazione circondando ciascuna una rispettiva struttura di attuazione dell'almeno una pluralità di strutture di attuazione (80A, 80B) ed essendo formate dallo stesso materiale della seconda regione piezoelettrica (93).

11. Regolatore di flusso (200; 250; 270) comprendente:

- un corpo di canale (205; 255);
- un canale fluidico (210; 260) estendentesi all'interno del corpo di canale e avente una porzione di estremità ;
- l'attuatore MEMS secondo una qualunque delle rivendicazioni 8-10, in cui la porzione mobile (56) è affacciata alla porzione di estremità ed è configurata in modo da modificare una sezione di passaggio compresa fra la porzione di estremità e la porzione mobile;

– un'unità di controllo (220), accoppiata all'attuatore MEMS e configurata in modo da fornire una tensione di polarizzazione all'almeno una pluralità di strutture di attuazione (80A, 80B) e da ricevere una tensione di rilevamento dall'almeno una struttura di rilevamento (91).

12. Regolatore di flusso secondo la rivendicazione precedente, in cui la porzione di estremità del canale fluidico è a contatto, a riposo, alla porzione mobile (56).

13. Regolatore di flusso secondo la rivendicazione 11, in cui la porzione di estremità del canale fluidico si estende, a distanza, a riposo, dalla porzione mobile (56) e forma con questa un passaggio fluidico (265; 285).

14. Altoparlante (300) comprendente:

- un telaio (303) delimitante una cavità (305);
- un diaframma (306), fissato al telaio e sospeso sulla cavità;
 - l'attuatore MEMS di una qualsiasi delle rivendicazioni 8-10, in cui la struttura deformabile (54) è accoppiata al diaframma ed è configurata per provocarne una deformazione;
 - un'unità di controllo (320), accoppiata all'attuatore MEMS e configurata in modo da fornire una tensione di polarizzazione all'almeno una pluralità di strutture di attuazione (80A, 80B) e da ricevere una tensione di rilevamento dall'almeno una struttura di rilevamento

(91).

15. Metodo di attuazione dell'attuatore MEMS secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 2-10, comprendente le fasi di:

- fornire, da parte di un'unità di controllo, una prima tensione di polarizzazione alla prima pluralità di strutture di attuazione (80A) e non fornire alcuna tensione di polarizzazione alla seconda pluralità di strutture di attuazione (80B), in modo da provocare una deformazione locale di porzioni degli elementi deformabili (55) portanti le strutture di attuazione della prima pluralità di strutture di attuazione e la traslazione della porzione mobile (56) in una prima direzione;

- fornire, da parte dell'unità di controllo, una seconda tensione di polarizzazione alla seconda pluralità di strutture di attuazione (80B) e non fornire alcuna tensione di polarizzazione alla prima pluralità di strutture di attuazione (80A), in modo da provocare una deformazione locale di porzioni degli elementi deformabili (55) portanti le strutture di attuazione della seconda pluralità di strutture di attuazione e la traslazione della porzione mobile in una seconda direzione, opposta alla prima.

16. Procedimento di fabbricazione di un attuatore MEMS, comprendente le fasi di:

formare una cavità (452, 52) in un substrato di

lavoro (405) di una fetta (400) di materiale semiconduttore, definendo una struttura deformabile (54), sospesa sulla cavità, e una porzione a cornice (53), circondante la struttura sospesa;

definire la struttura deformabile (54) per formare una porzione mobile (56) e una pluralità di elementi deformabili (55), disposti consecutivamente uno all'altro e colleganti la porzione mobile alla porzione a cornice e soggetti ciascuno ad una deformazione; e

formare almeno una pluralità di strutture di attuazione (80A, 80B) al di sopra degli elementi deformabili (55), le strutture di attuazione comprendendo ciascuna una rispettiva prima regione piezoelettrica (82).

17. Procedimento di fabbricazione secondo la rivendicazione precedente, in cui formare una cavità in un substrato di lavoro comprende le fasi di:

formare, su una prima superficie (405A) del substrato di lavoro (405), una pluralità di regioni di sagomatura (407, 408);

formare, sulla pluralità di regioni di sagomatura, uno strato di irrigidimento (409) e uno strato strutturale (411);

formare una pluralità di trincee (445) nello strato strutturale; e

rimuovere selettivamente il substrato a partire da una seconda superficie (405B), opposta alla prima superficie,

fino allo strato strutturale, formando la cavità, una pluralità di strutture di irrigidimento (85), la struttura deformabile (54) e una struttura di otturatore (86) sporgente dallo strato strutturale verso la cavità.

18. Procedimento di fabbricazione secondo la rivendicazione 16 o 17, comprendente inoltre la fase di formare almeno una struttura di rilevamento (91) al di sopra degli elementi deformabili, l'almeno una struttura di rilevamento comprendendo ciascuna una rispettiva seconda regione piezoelettrica (93).

19. Procedimento di fabbricazione secondo la rivendicazione precedente, in cui:

formare l'almeno una pluralità di strutture di attuazione comprende:

formare una pluralità di regioni di elettrodo inferiore di attuazione (81) a partire da un primo strato di materiale conduttivo (420);

formare una pluralità di prime regioni piezoelettriche (82), ciascuna prima regione piezoelettrica sopra una rispettiva regione di elettrodo inferiore di attuazione, a partire da un primo strato di materiale piezoelettrico (421);
e

formare una pluralità di regioni di elettrodo superiore di attuazione (83), ciascuna regione di elettrodo superiore di attuazione sopra una rispettiva prima regione

piezoelettrica, a partire da un secondo strato di materiale conduttivo (422); e

formare l'almeno una struttura di rilevamento comprende:

formare almeno una regione di elettrodo inferiore di rilevamento (92) a partire dal primo strato conduttivo (420);

formare la rispettiva seconda regione piezoelettrica (93) sopra l'almeno una regione di elettrodo inferiore di rilevamento, a partire da un secondo strato di materiale piezoelettrico (423);

formare almeno una regione di elettrodo superiore di rilevamento (94), ciascuna regione di elettrodo superiore di rilevamento sopra una rispettiva seconda regione piezoelettrica, a partire da un terzo strato di materiale conduttivo (424).

20. Procedimento di fabbricazione secondo la rivendicazione precedente, in cui formare la rispettiva seconda regione piezoelettrica comprende depositare il secondo strato di materiale piezoelettrico (423) e definire il secondo strato di materiale piezoelettrico, formando la rispettiva seconda regione piezoelettrica (93) e una pluralità di regioni di passivazione (431), ciascuna regione di passivazione circondando una rispettiva struttura di attuazione (80A, 80B) appartenente all'almeno una pluralità di strutture di attuazione.

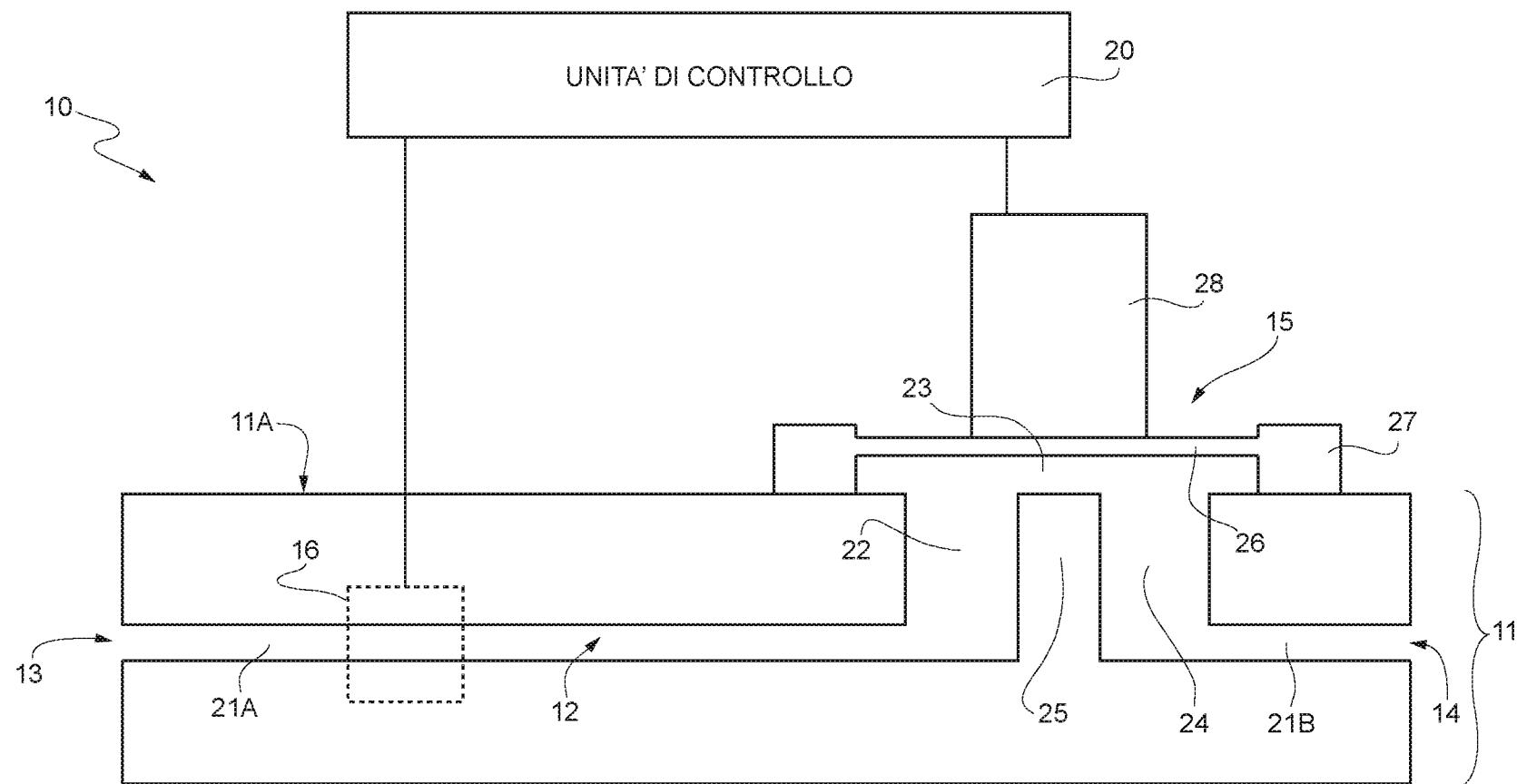


FIG. 1

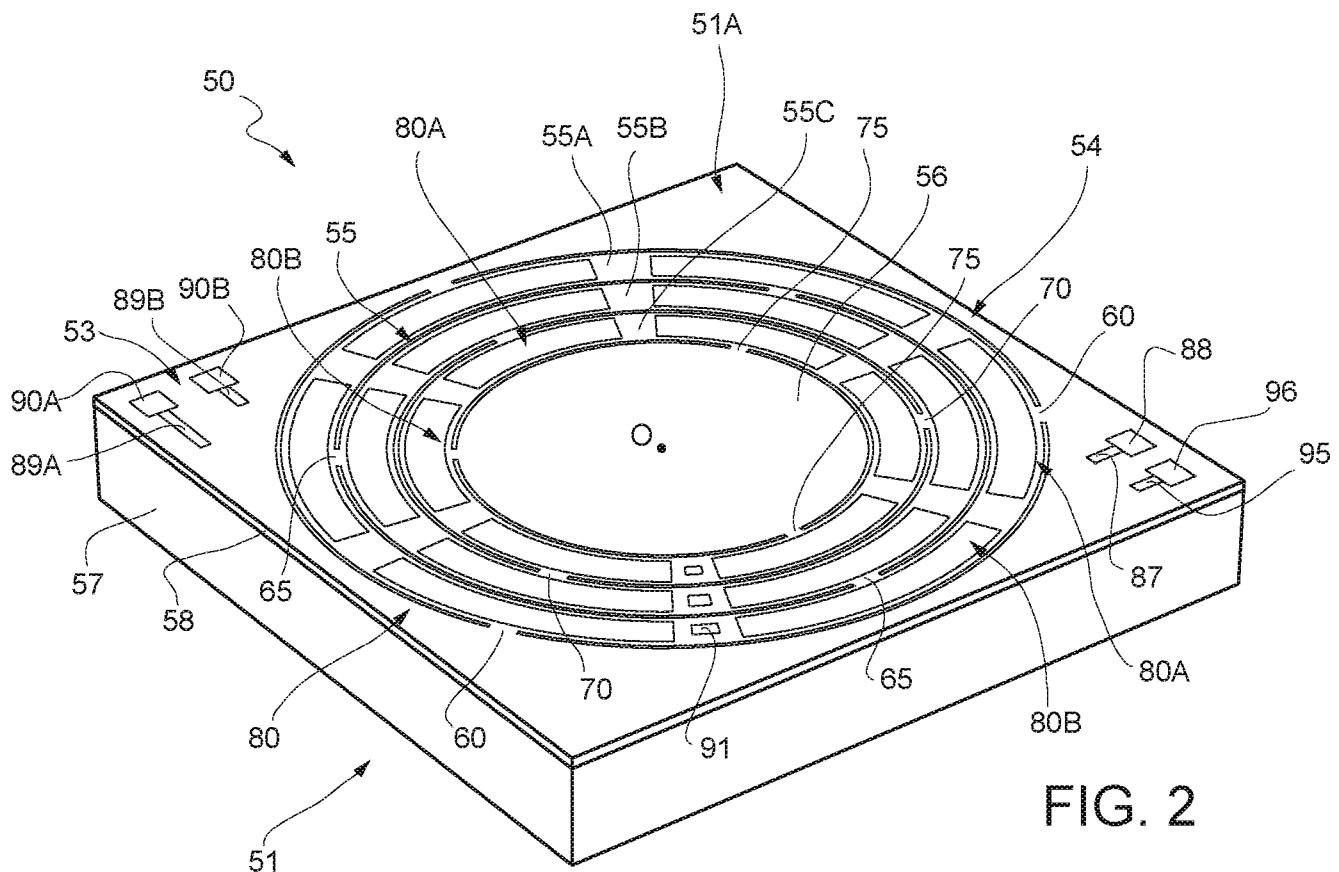


FIG. 2

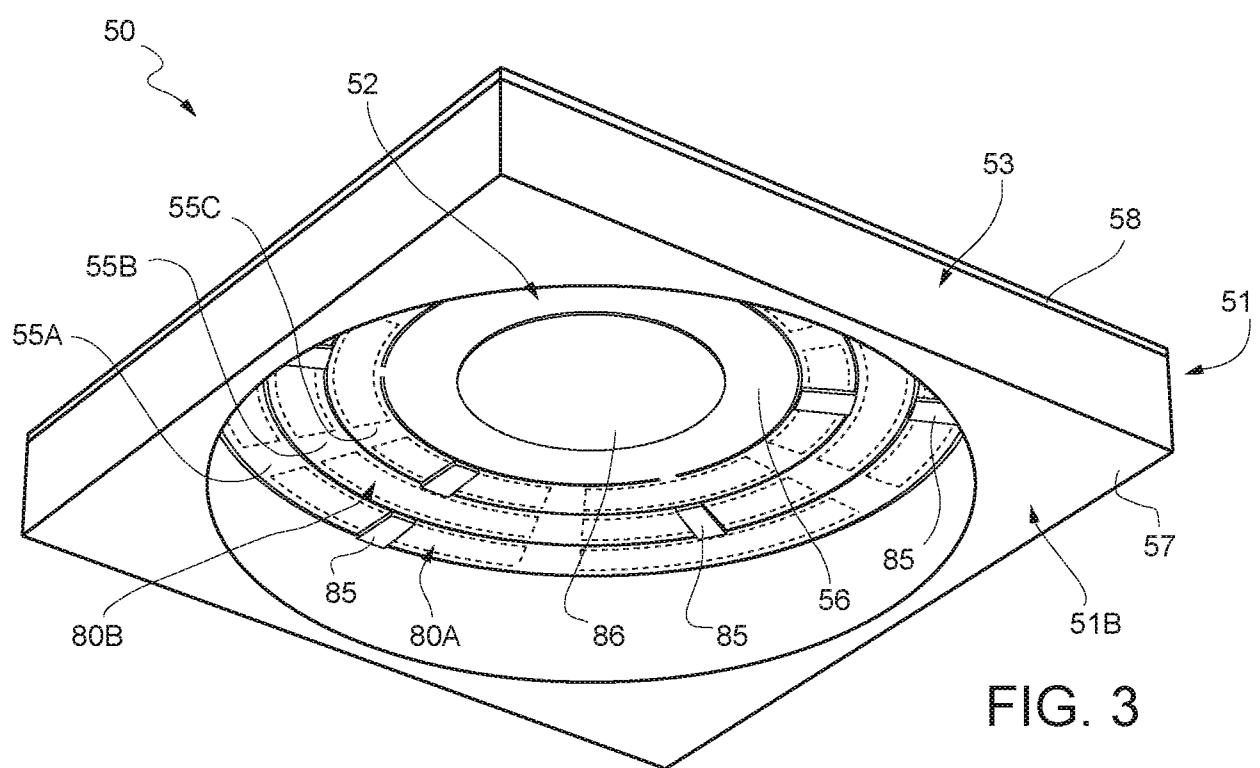


FIG. 3

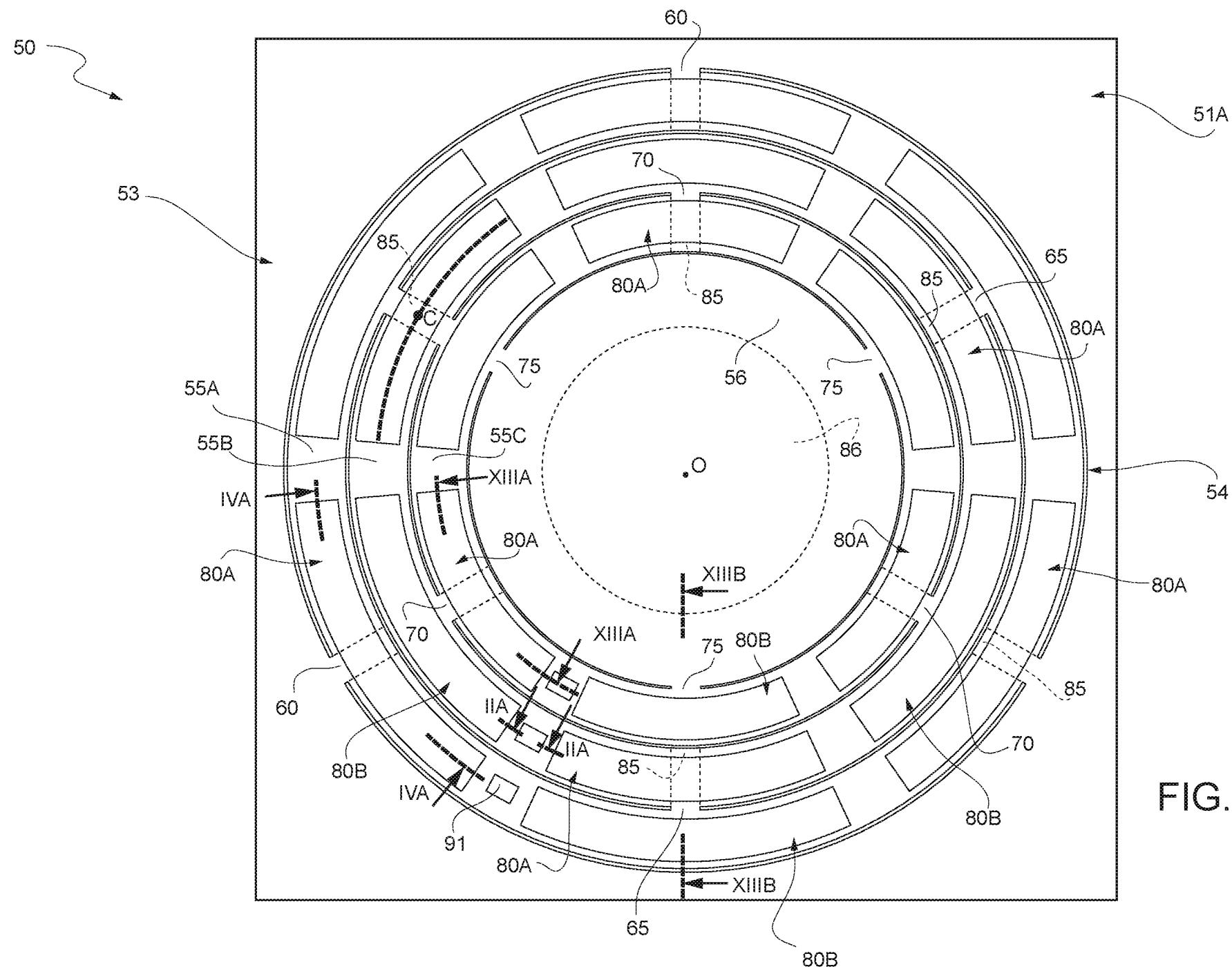


FIG. 4

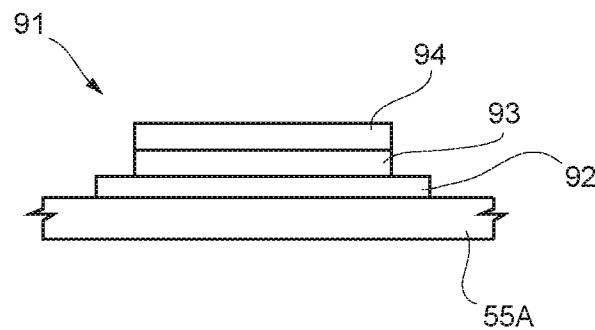


FIG. 2A

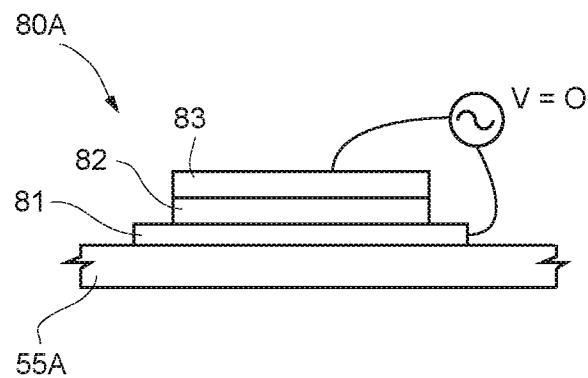


FIG. 4A

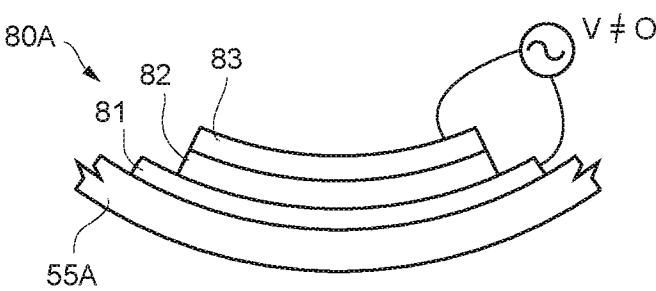
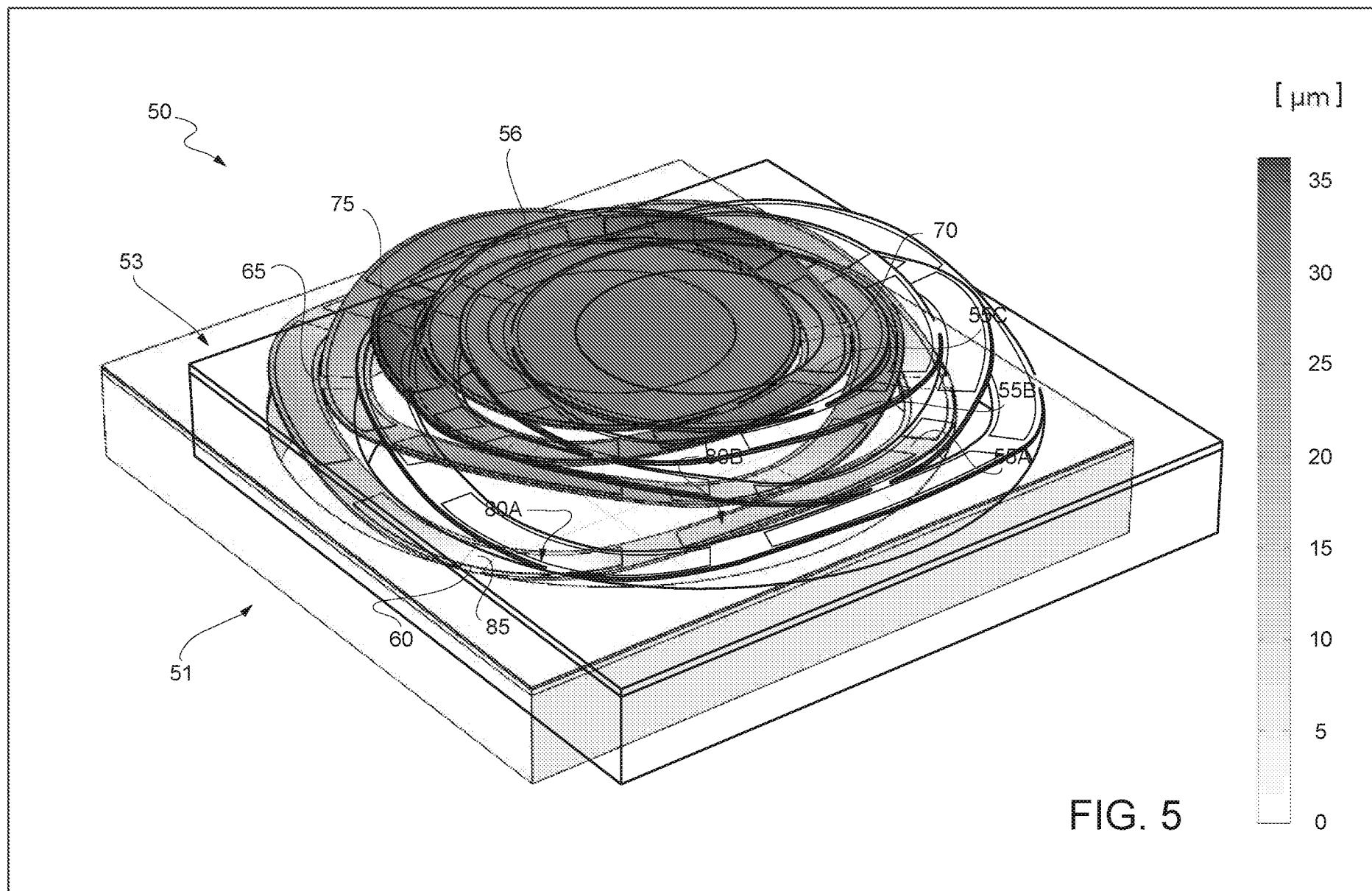
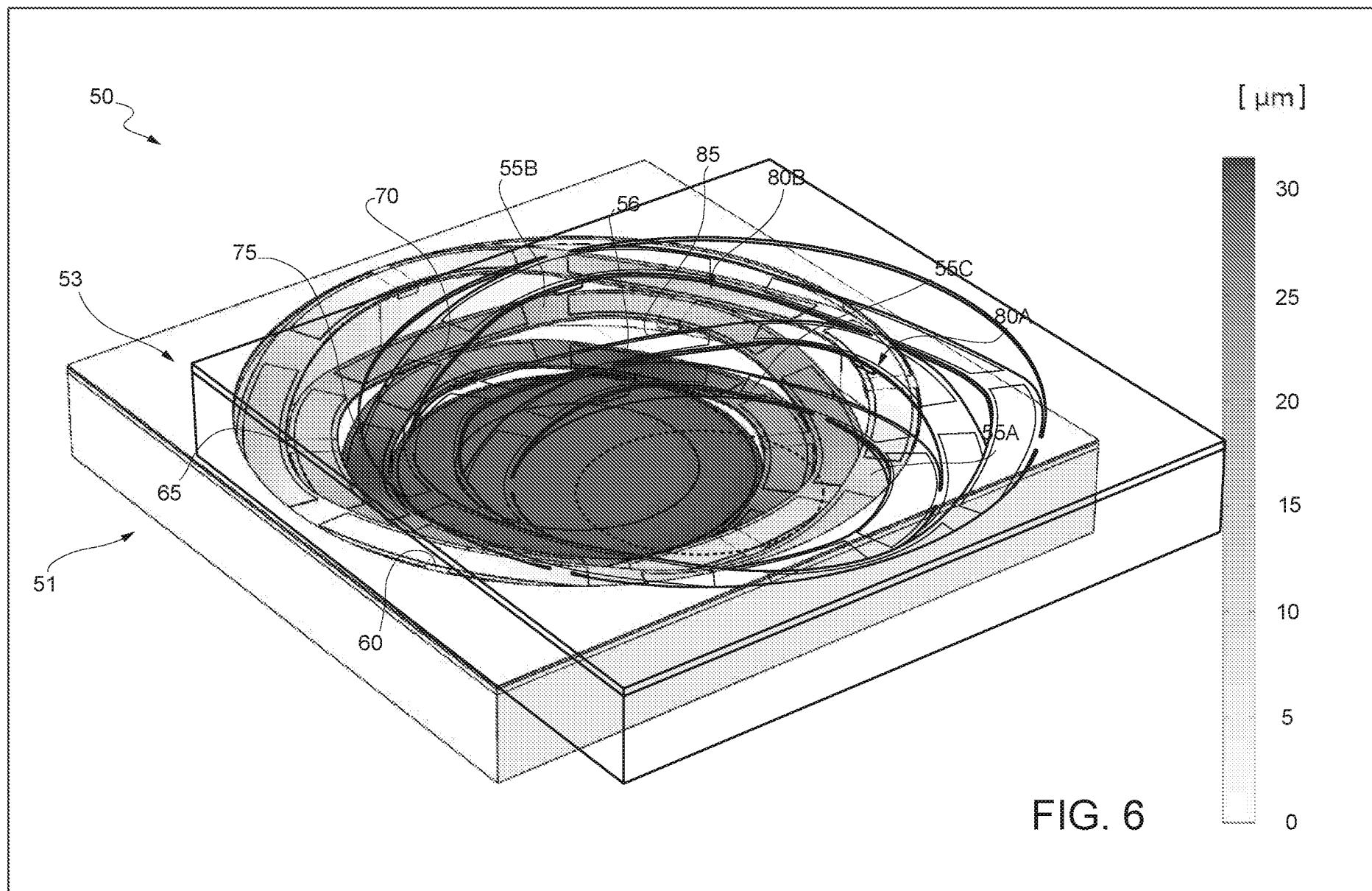


FIG. 4B





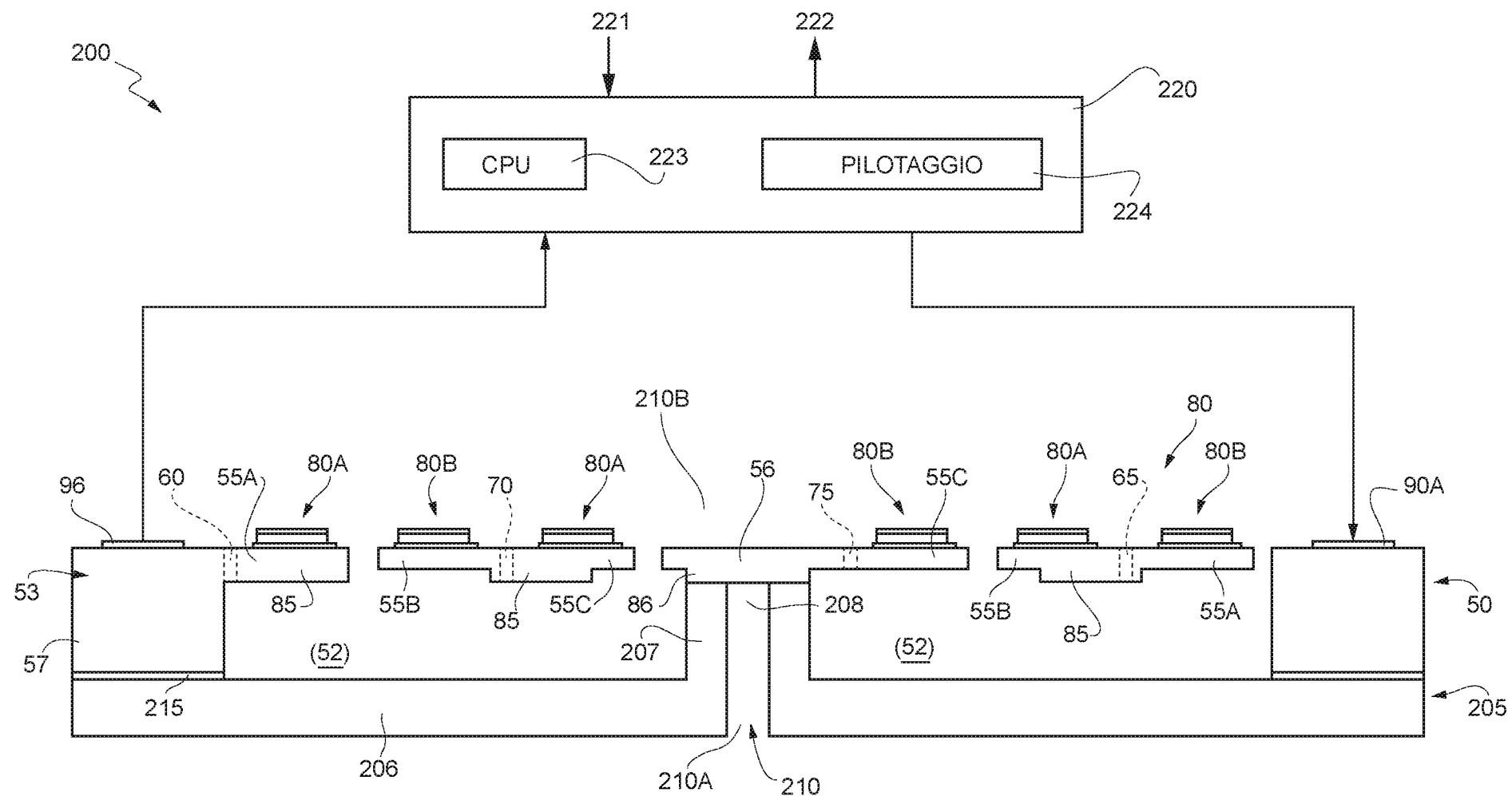


FIG. 7

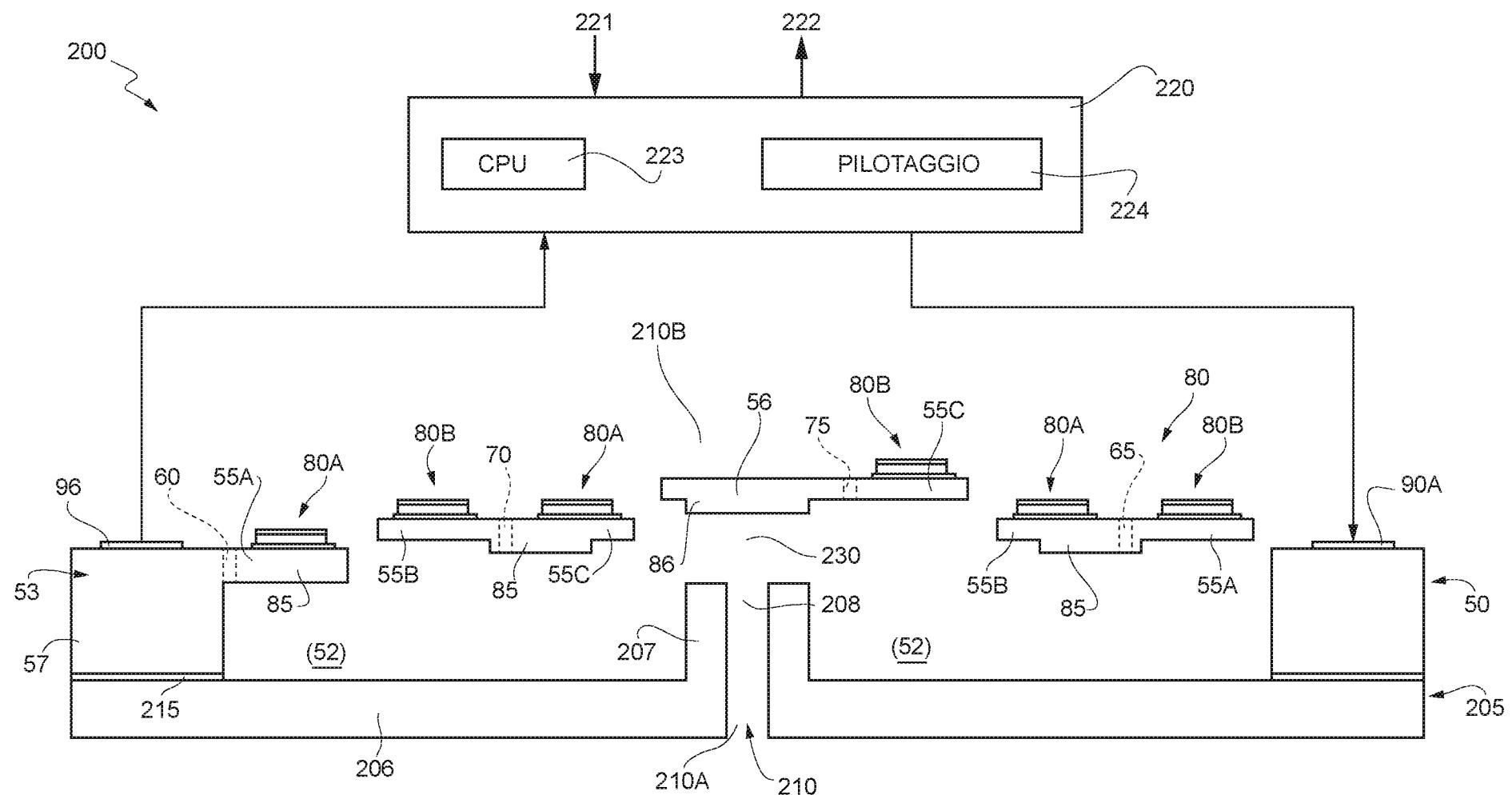


FIG. 8

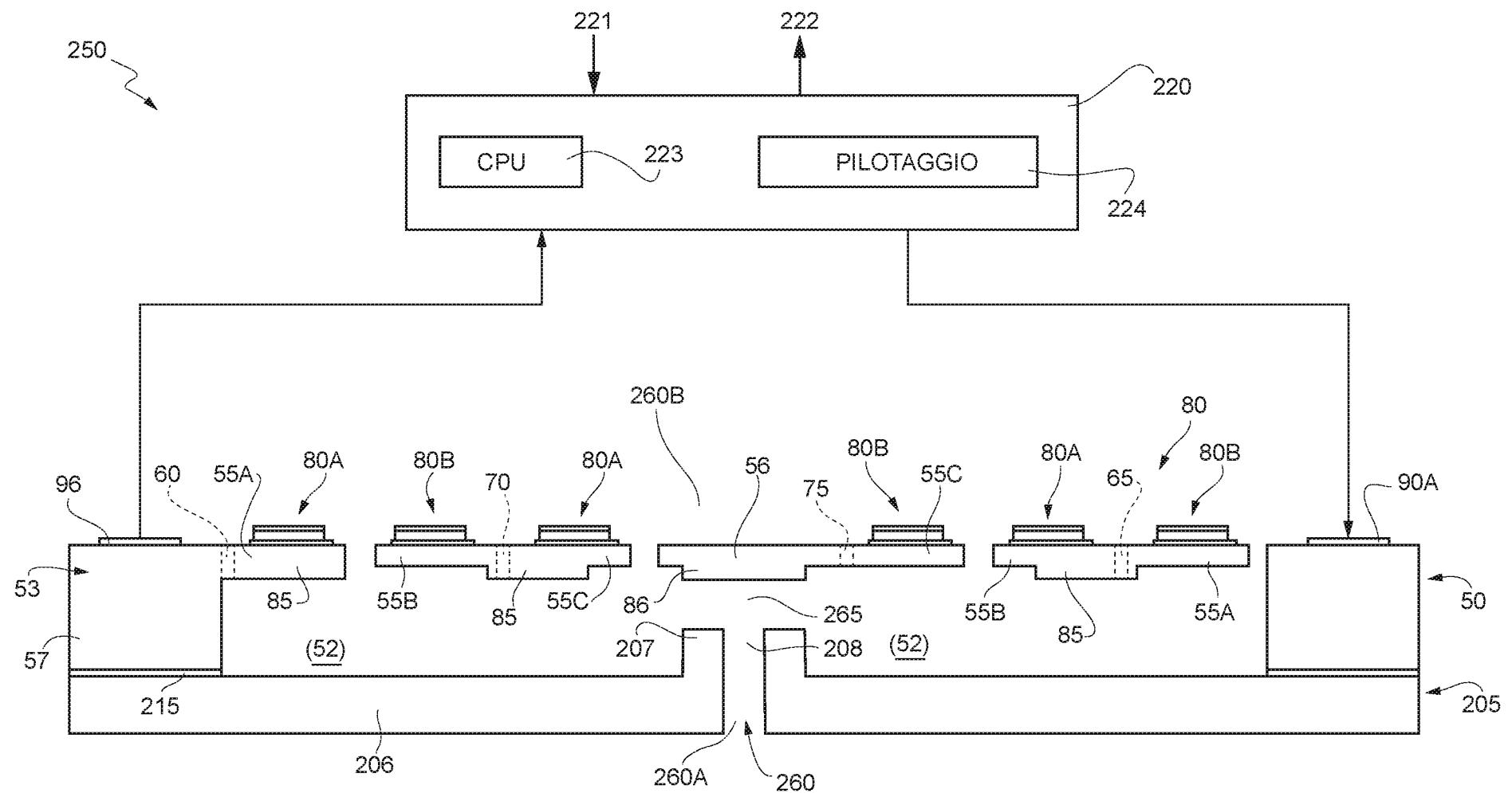


FIG. 9

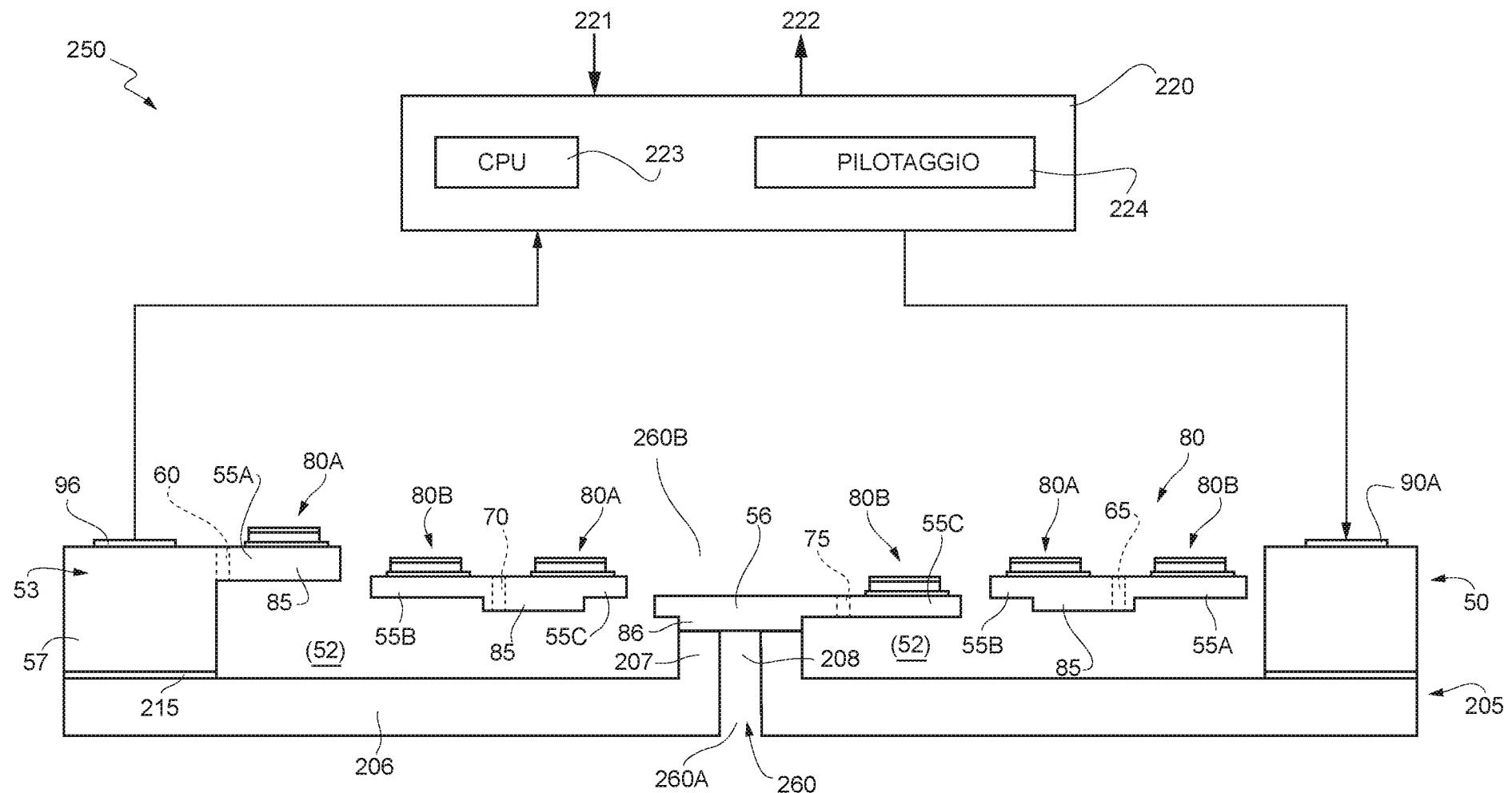


FIG. 10

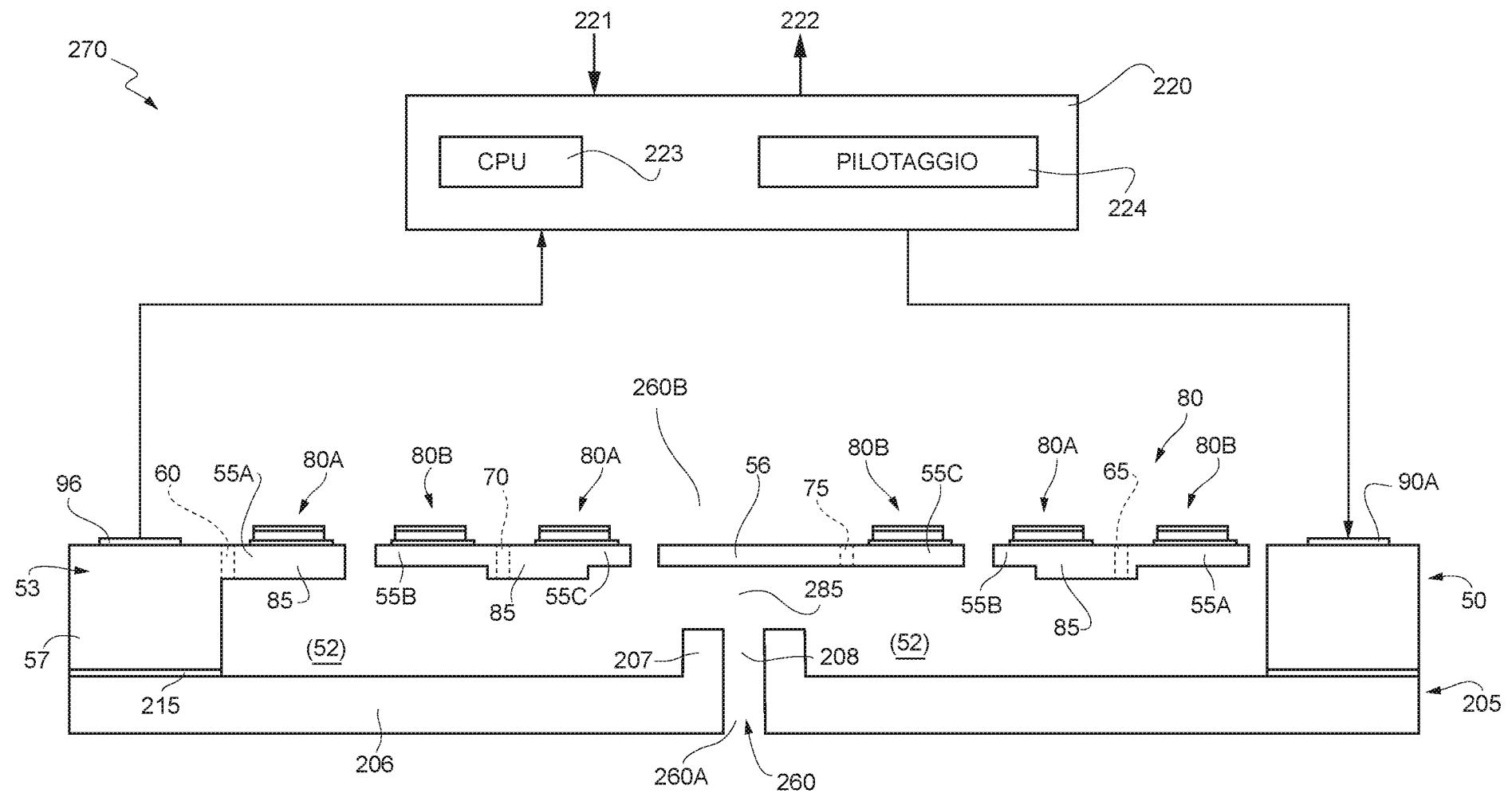


FIG. 11

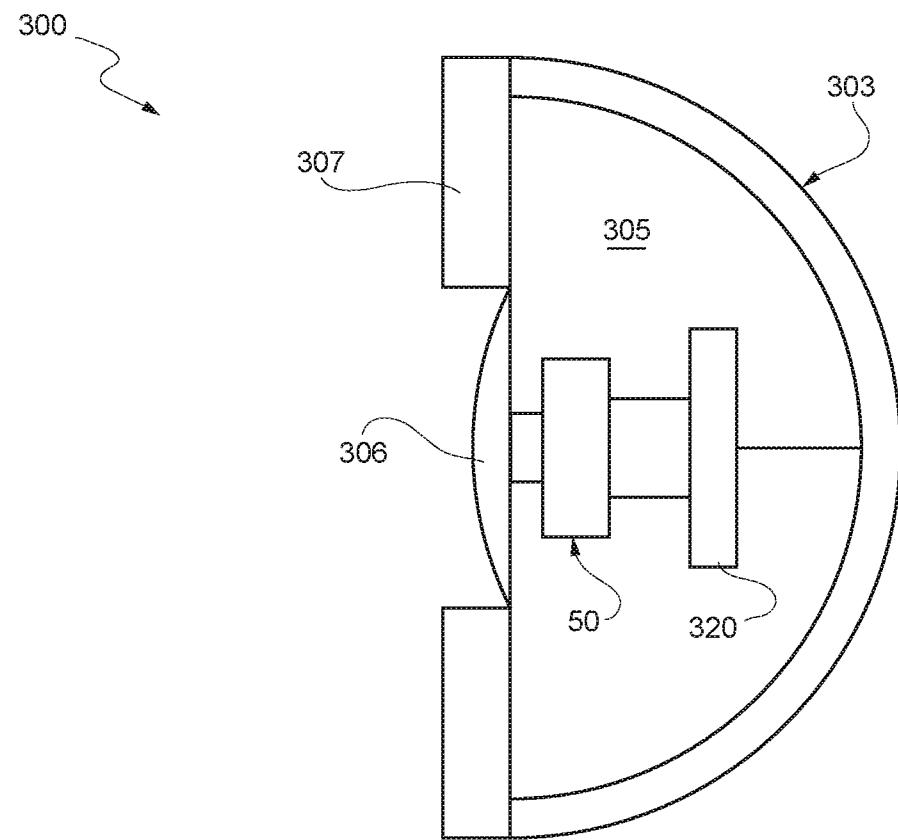
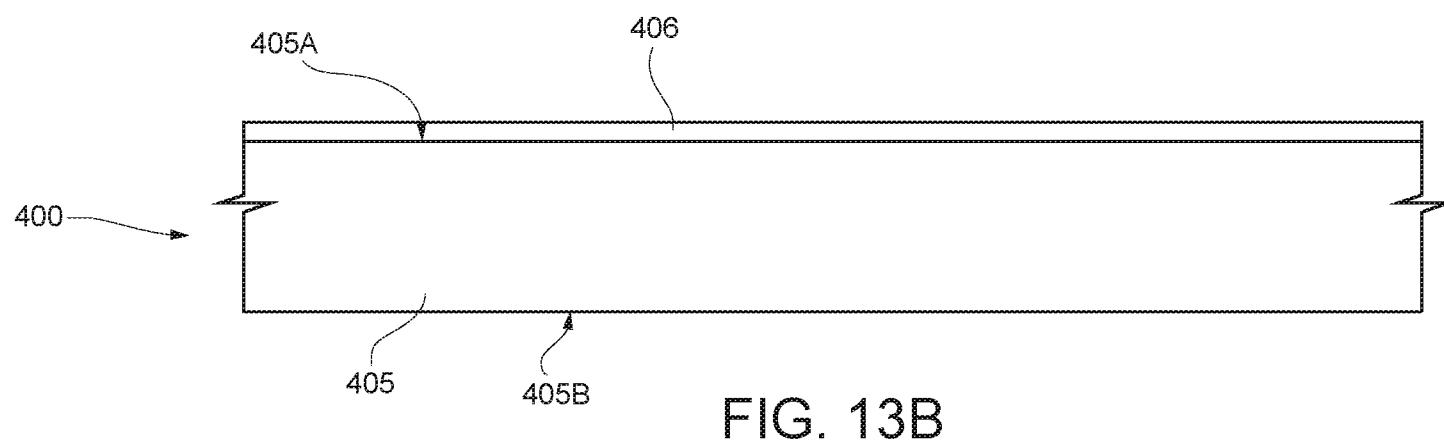
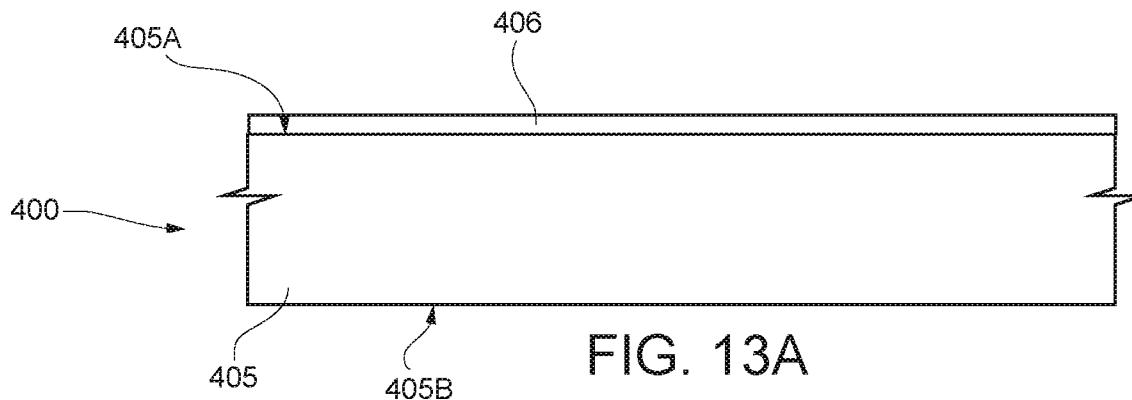
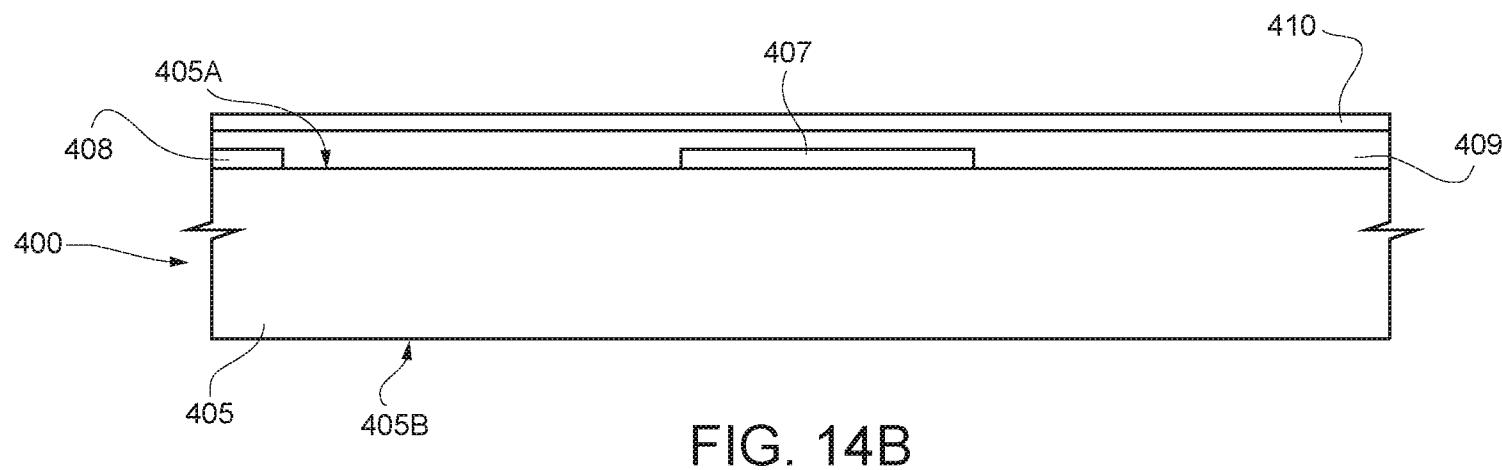
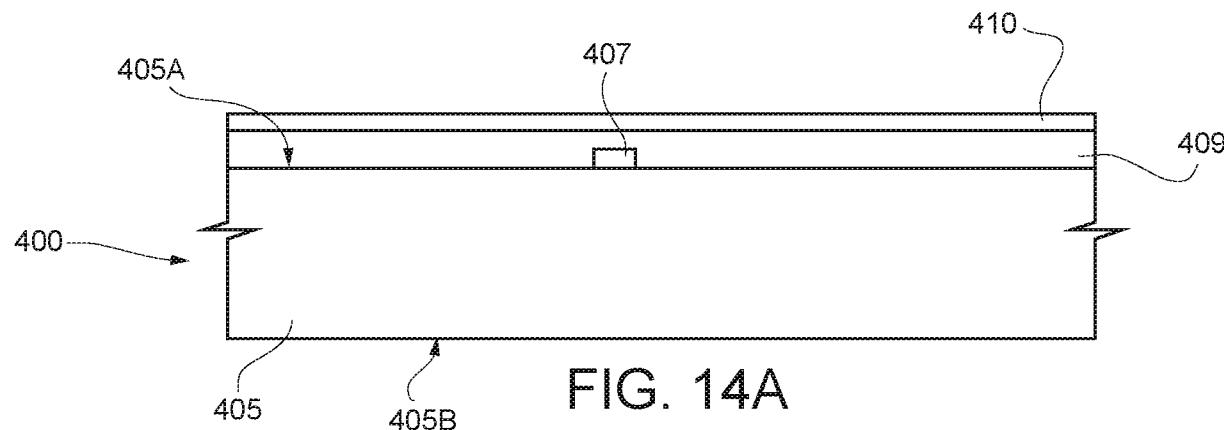
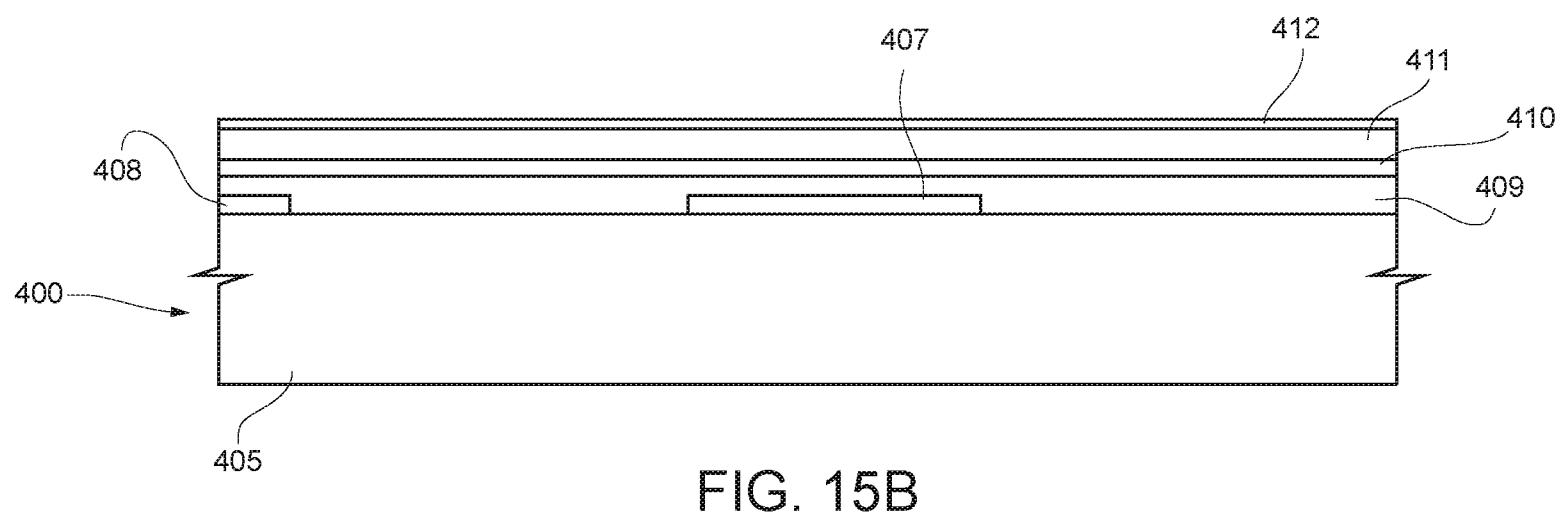
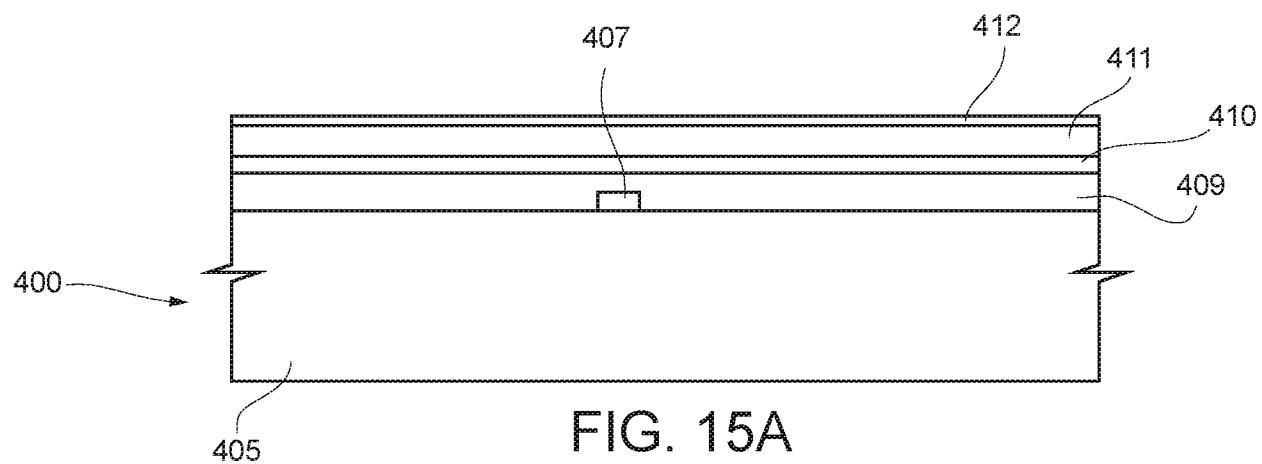


FIG. 12







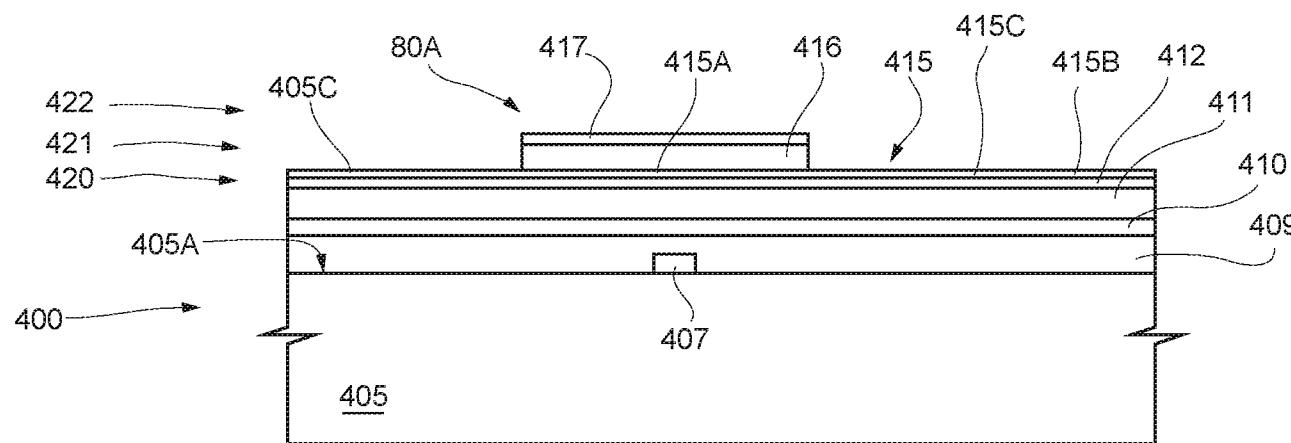


FIG. 16A

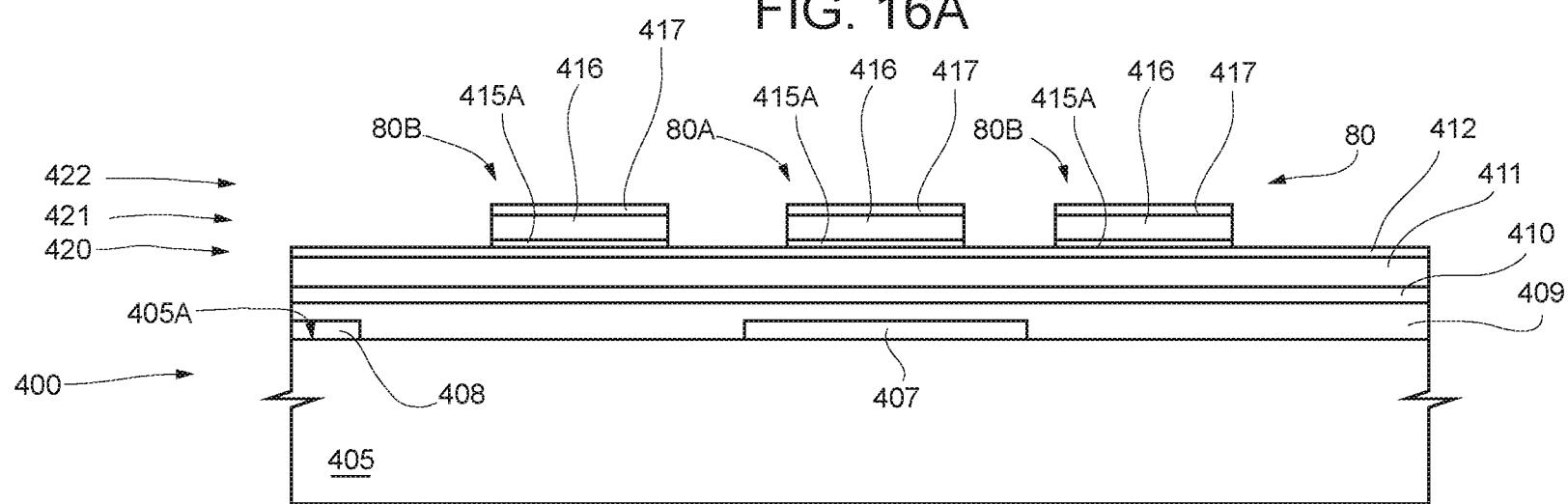


FIG. 16B

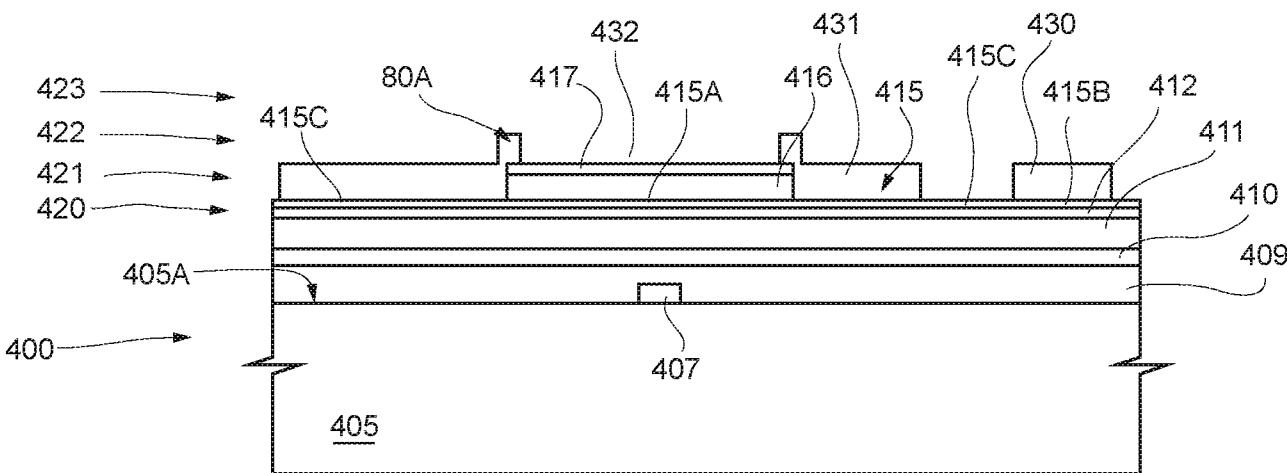


FIG. 17A

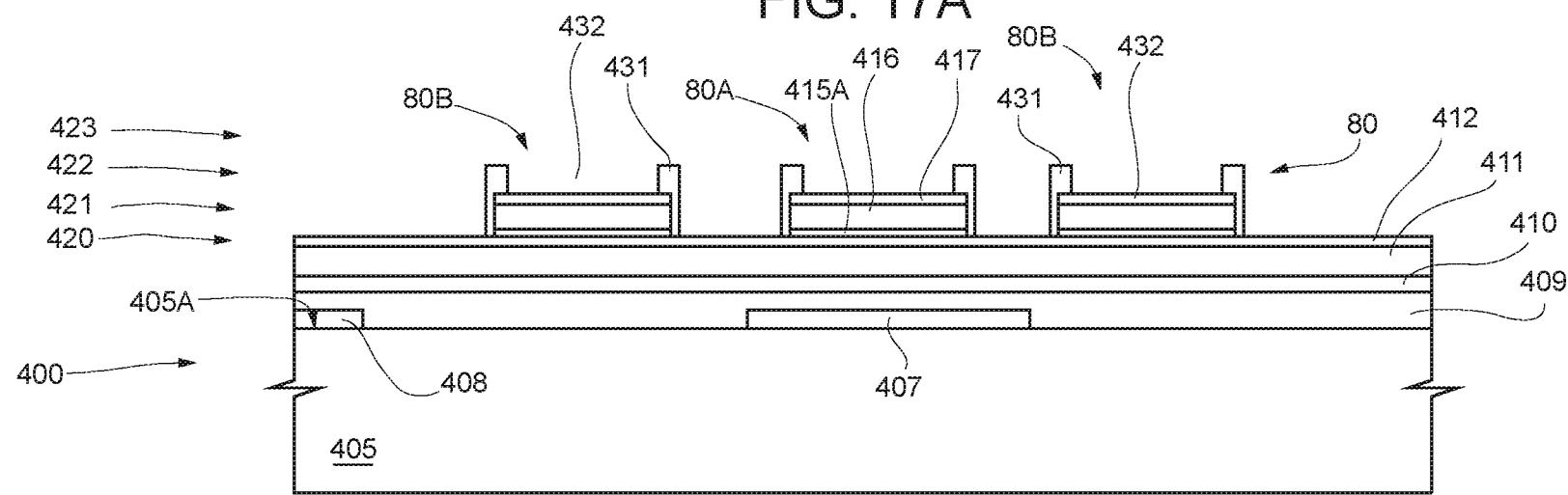


FIG. 17B

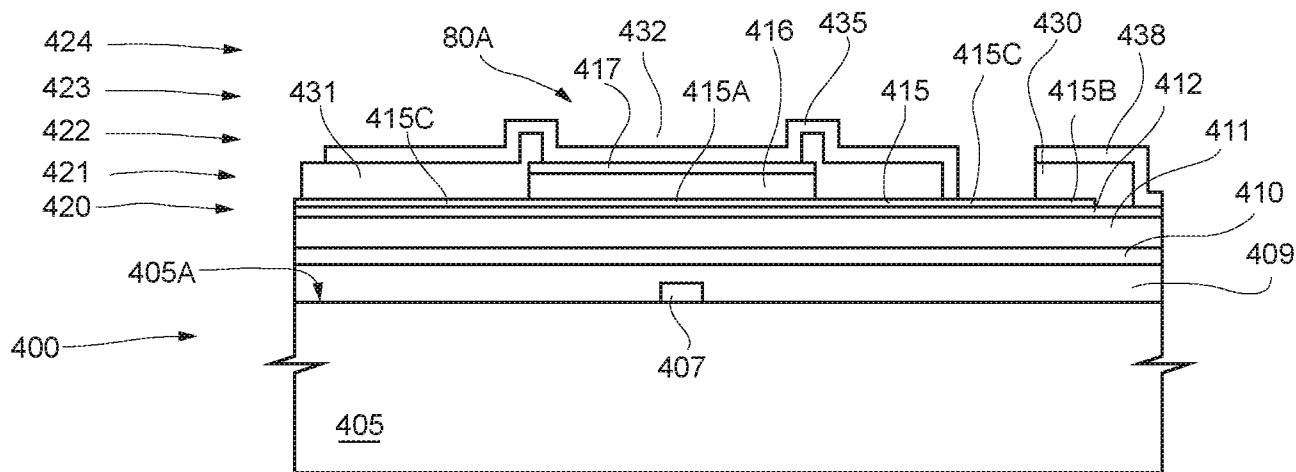


FIG. 18A

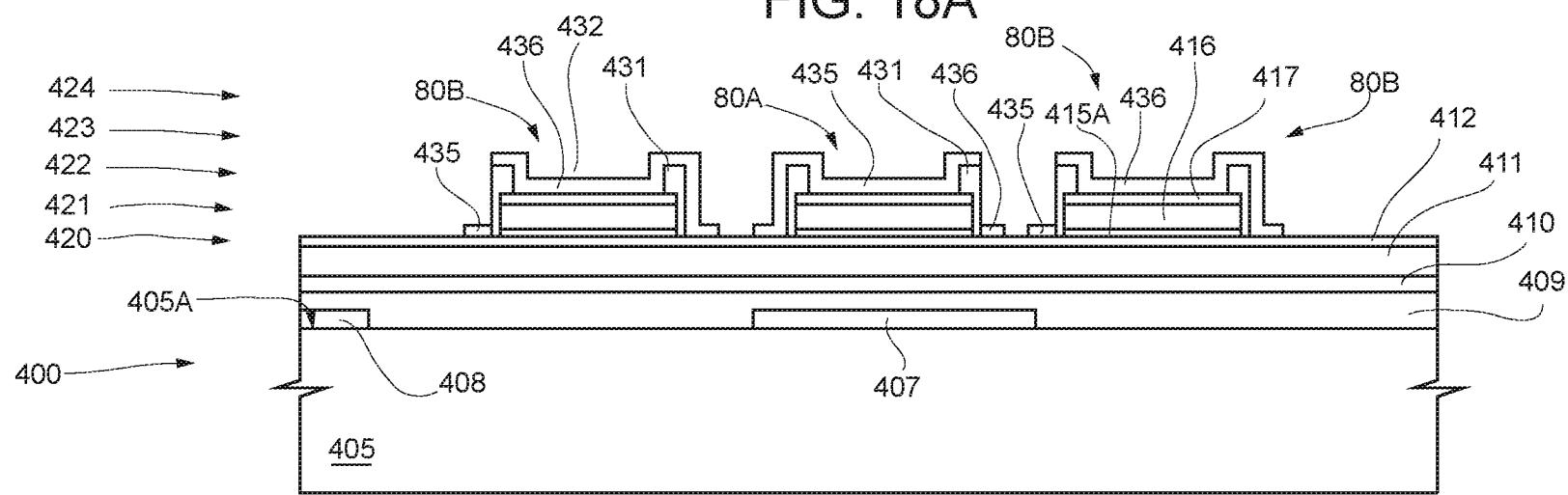


FIG. 18B

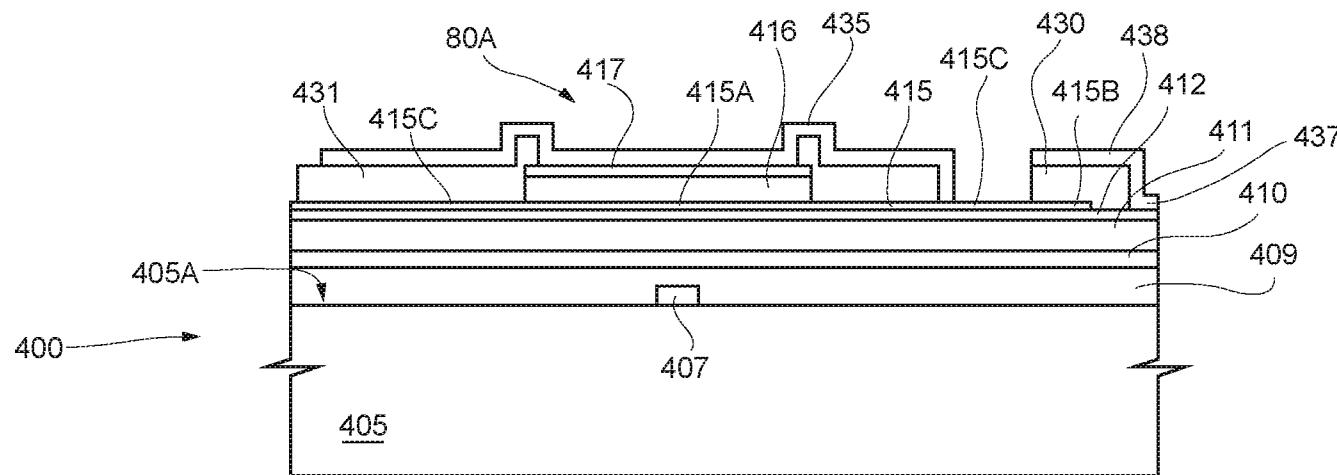


FIG. 19A

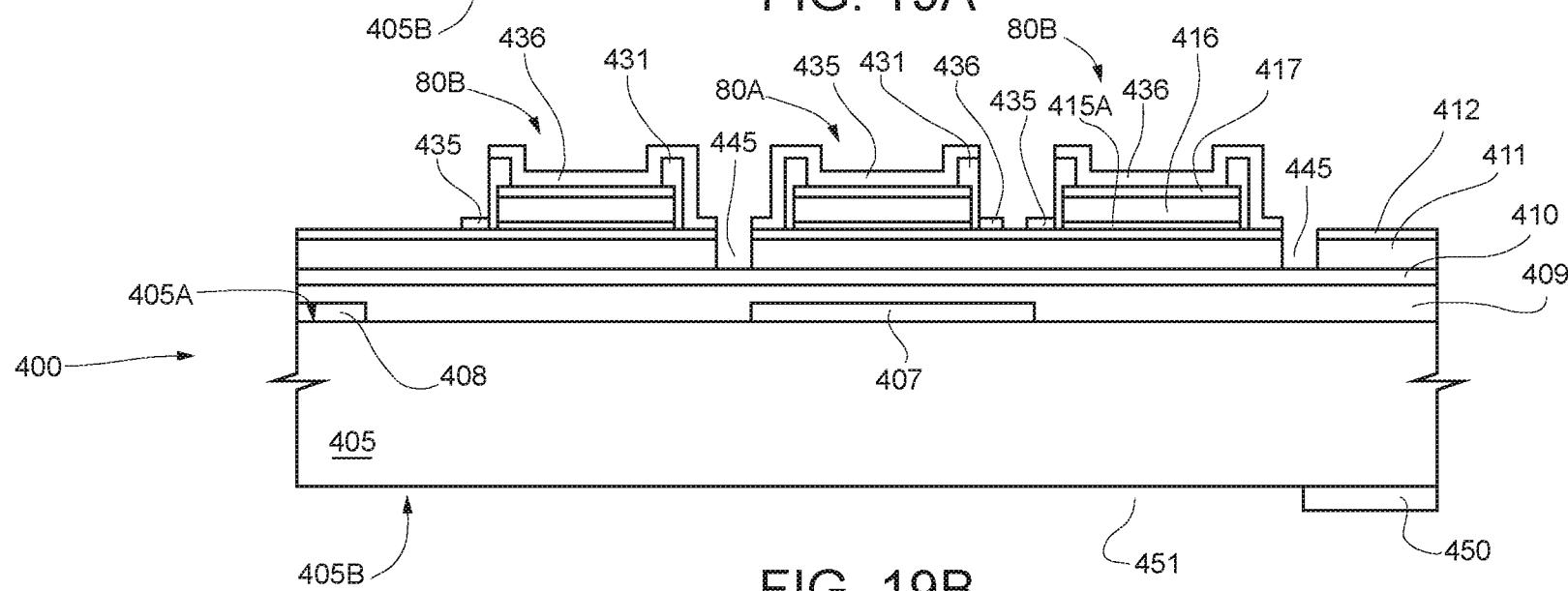


FIG. 19B

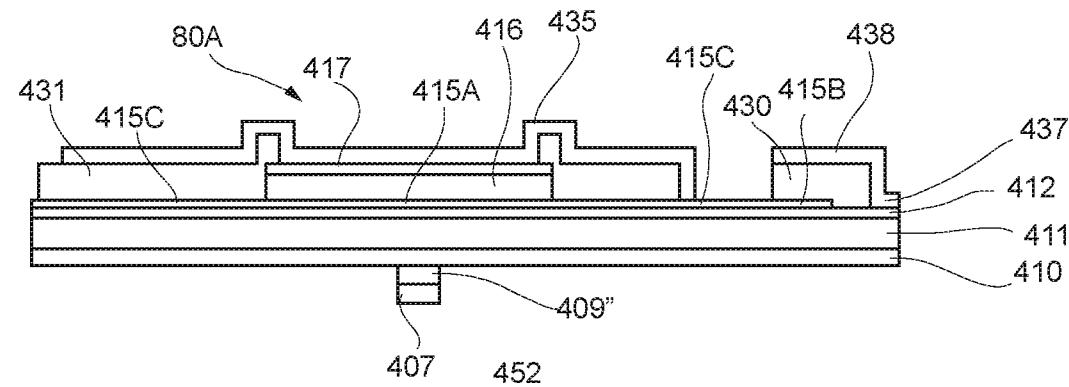
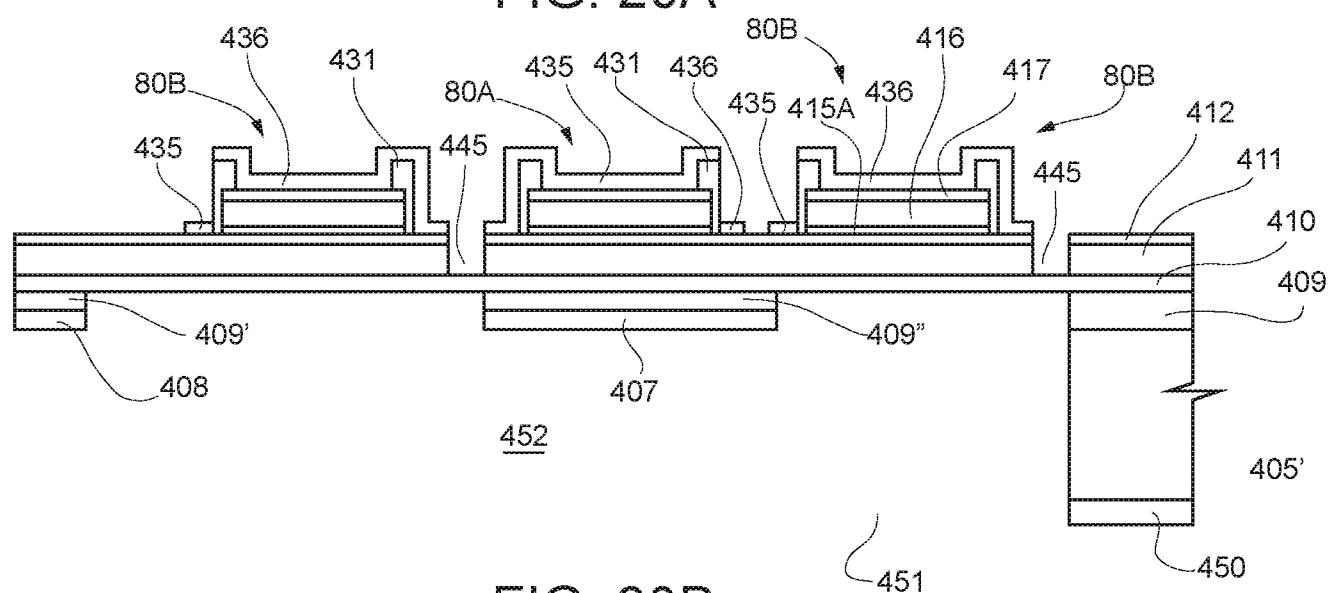


FIG. 20A



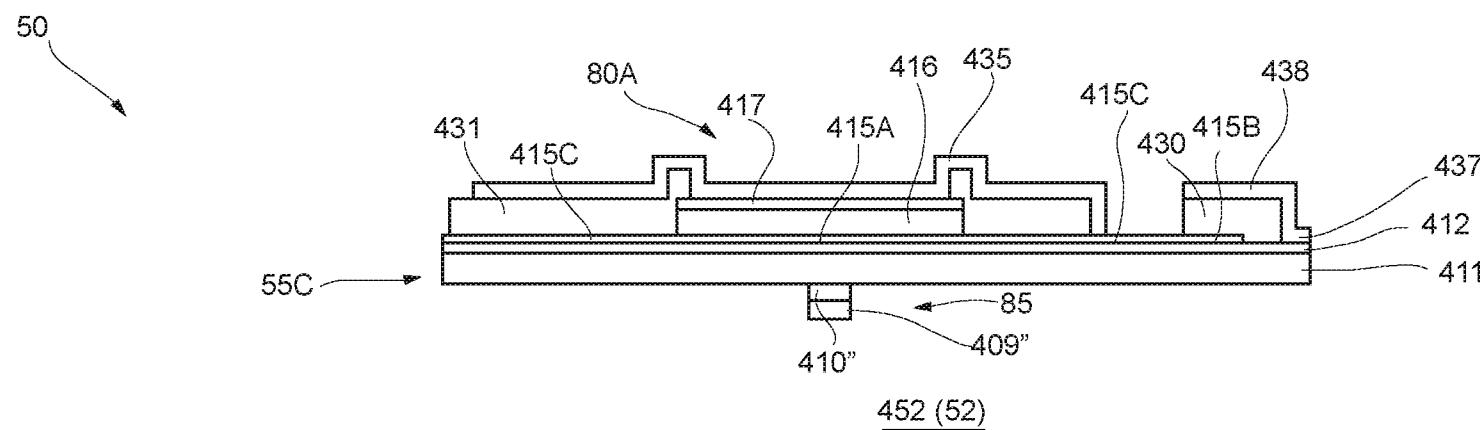


FIG. 21A

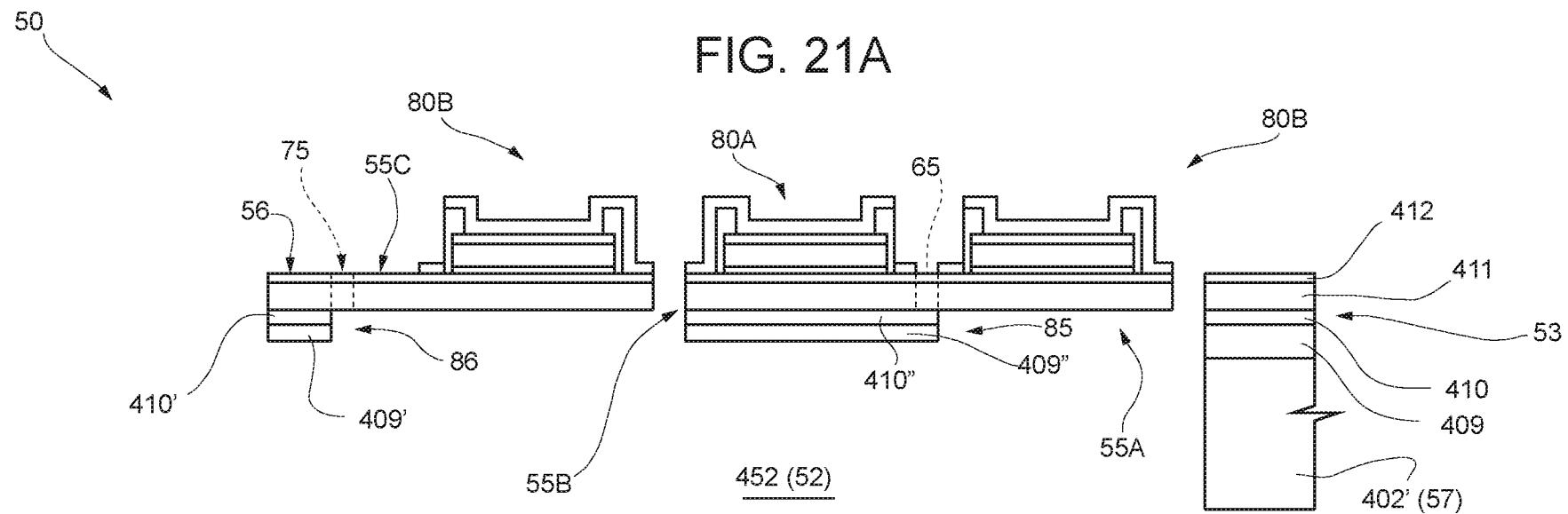


FIG. 21B