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

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	**102018000010523**
Data Deposito	**22/11/2018**
Data Pubblicazione	**22/05/2020**

Classifiche IPC

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
F	16	C	19	52

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
F	16	C	35	04

Titolo

Dispositivo di supporto sensorizzato per cuscinetti

DESCRIZIONE dell'invenzione industriale dal titolo:

"Dispositivo di supporto sensorizzato per cuscinetti",

di: ELTEK S.p.A., di nazionalità italiana, con sede in Strada Valenza, 5A – 15033 Casale Monferrato (AL).

Inventori designati: Marco PIZZI, Massimo ZANIN, Stefano ALLERA.

Depositata il: 22 novembre 2018

* * *

TESTO DELLA DESCRIZIONE

Campo dell'invenzione

La presente invenzione si riferisce ai dispositivi di supporto per cuscinetti, comprendenti almeno un elemento sensore configurato per rilevare un carico o uno sforzo applicato su di un alloggiamento di cuscinetto o, più in generale, per rilevare una vibrazione o un pur minimo movimento o spostamento dell'alloggiamento di cuscinetto, ad esempio rispetto ad una struttura di montaggio. L'invenzione è stata sviluppata con particolare riferimento ai dispositivi di supporto sensorizzati, nonché alle basi di supporto sensorizzate per tali dispositivi, aventi mezzi sensori di sforzo meccanico, dove una base di supporto sensorizzata è preferibilmente interposta almeno in parte tra un alloggiamento di cuscinetto ed una generica struttura di montaggio, alla quale tale alloggiamento è destinato ad essere assicurato.

Tecnica anteriore

Come è noto, i cuscinetti sono dispositivi concepiti per consentire il movimento relativo vincolato tra due parti, suscettibili di impiego in molti diversi tipi di macchinari per trattenere e supportare componenti rotanti.

Durante l'uso, il cuscinetto è soggetto a carichi diversi, sia statici che dinamici. Il carico statico è tipicamente proporzionale al peso supportato dal cuscinetto, mentre i carichi dinamici dipendono tipicamente dalle condizioni di impiego del cuscinetto. In molti sistemi è quindi desiderabile poter monitorare i carichi che agiscono su di un cuscinetto: ad esempio, in campo automobilistico, informazioni di carico dei cuscinetti dei mozzi delle ruote sono utilizzabili con vantaggio da sistemi di controllo di stabilità di un veicolo.

Le vibrazioni rappresentano un ulteriore parametro di una certa importanza, in

grado di fornire indicazioni sulle condizioni di un cuscinetto: ciò considerando che, ad esempio, vibrazioni eccessive possono essere un segno che un cuscinetto si sta avvicinando alla fine della sua vita utile. Oltre ai carichi sopportati dal cuscinetto può quindi risultare utile monitorizzare anche le relative vibrazioni.

EP 1528382 A1 descrive un dispositivo di supporto comprendente alloggiamento di cuscinetto cui è associata una sottostante base di supporto (*baseplate*), equipaggiata al proprio interno di mezzi per la misurazione di carico, rappresentati da estensimetri disposti in forma di ponte di Wheatstone. La base di supporto è di costruzione relativamente complessa, poiché presuppone lavorazioni meccaniche per conferirle una forma idonea a ricevere gli estensimetri. La base di supporto deve avere un certo spessore e gli estensimetri debbono essere montati in specifiche sedi ricavate trasversalmente in essa.

US 8869633 B2, sul quale si basa il preambolo della rivendicazione 1, descrive un simile dispositivo di supporto, comprensivo di un alloggiamento di cuscinetto con una sottostante base di supporto, che integra mezzi di misurazione costituiti da sensori piezo-resistivi. Anche in questo caso la base di supporto sensorizzata deve essere lavorata per definire sedi in cui vengono alloggiati i sensori piezo-resistivi. I sensori impiegati necessitano alimentazione elettrica e debbono essere di spessore adeguato, onde poter fornire variazioni di resistenza apprezzabili. Le informazioni desumibili attraverso tali sensori piezo-resistivi sono in ogni caso relativamente limitate.

Scopo e sintesi dell'invenzione

Nei suoi termini generali, la presente invenzione si propone essenzialmente di realizzare un dispositivo di supporto per alloggiamenti di cuscinetti, con una base sensorizzata, di fabbricazione semplice, compatta ed economica, ma contraddistinta da una elevata precisione di rilevazione ed affidabilità di funzionamento.

Questo ed altri scopi ancora, che risulteranno maggiormente chiari in seguito, sono raggiunti secondo la presente invenzione da un dispositivo di supporto sensorizzato per cuscinetti avente le caratteristiche indicate nelle rivendicazioni allegate. Le rivendicazioni costituiscono parte integrante dell'insegnamento tecnico qui fornito in relazione all'invenzione.

Breve descrizione dei disegni

Ulteriori scopi, caratteristiche e vantaggi dell'invenzione risulteranno chiari dalla descrizione particolareggiata che segue, effettuata con riferimento ai disegni annessi, forniti a puro titolo di esempio esplicativo e non limitativo, nei quali:

- la figura 1 è una vista prospettica schematica di un dispositivo di supporto sensorizzato in accordo a possibili forme di attuazione dell'invenzione, assicurato meccanicamente ad una generica struttura di montaggio;

- la figura 2 è una vista in elevazione del dispositivo di supporto sensorizzato di figura 1;

- la figura 3 è una sezione schematica secondo la linea III-III di figura 2;

- la figura 4 è una vista prospettica schematica, parzialmente sezionata, del dispositivo di supporto sensorizzato di figura 1;

- le figure 5 e 6 sono viste prospettiche schematiche da diverse angolazioni di un dispositivo di supporto sensorizzato in accordo a possibili forme di attuazione dell'invenzione;

- la figura 7 è una vista schematica esplosa del dispositivo di supporto sensorizzato delle figure 5-6;

- la figura 8 è una vista prospettica schematica, parzialmente sezionata, di una porzione del dispositivo di supporto sensorizzato delle figure 5-6;

- la figura 9 è una vista prospettica schematica in esploso di un dispositivo di supporto sensorizzato in accordo a possibili forme di attuazione dell'invenzione;

- la figura 10 è una vista prospettica, parziale e schematica, di una base di supporto sensorizzata di un dispositivo di supporto in accordo a possibili forme di attuazione dell'invenzione;

- la figura 11 è una vista schematica esplosa di un primo trasduttore piezoelettrico di una base di supporto sensorizzata di un dispositivo di supporto in accordo a possibili forme di attuazione dell'invenzione;

- la figura 12 è una vista schematica esplosa di un secondo trasduttore piezoelettrico di una base di supporto sensorizzata di un dispositivo di supporto in accordo a possibili forme di attuazione dell'invenzione;

- le figure 13 e 14 sono rappresentazioni schematiche in pianta e dal basso, rispettivamente, di un trasduttore piezoelettrico del tipo mostrato in figura 11;

- la figura 15 è una vista prospettica schematica di una porzione di una base di supporto sensorizzata di un dispositivo di supporto in accordo a possibili forme di attuazione dell'invenzione;

- la figura 16 è una vista prospettica schematica di una porzione di una base di supporto sensorizzata di un dispositivo di supporto in accordo a possibili forme di attuazione dell'invenzione;

- la figura 17 è una prima vista prospettica sezionata della porzione di base di supporto sensorizzata di figura 16;

- la figura 18 è un dettaglio in maggior scala di figura 17;

- la figura 19 è una seconda vista prospettica sezionata della porzione di base di supporto sensorizzata di figura 16;

- la figura 20 è un dettaglio in maggior scala di figura 19;

- le figure 21 e 22 sono rappresentazioni schematiche in elevazione frontale di un trasduttore piezoelettrico di una base di supporto sensorizzata di un dispositivo di supporto in accordo a prime possibili forme di attuazione dell'invenzione, in due differenti configurazioni di collegamento elettrico;

- la figura 23 è una vista prospettica schematica volta ad esemplificare un principio di funzionamento di un trasduttore piezoelettrico di una base di supporto sensorizzata di un dispositivo di supporto in accordo a prime possibili forme di attuazione dell'invenzione;

- la figura 24 è una vista simile a quelle di figura 16, relativa ad una base di supporto sensorizzata in accordo a seconde possibili forme di attuazione dell'invenzione;

- le figure 25 e 26 sono rappresentazioni schematiche simili quelle delle figure 21e 22, relative ad una base di supporto sensorizzata del tipo mostrato in figura 24;

- la figura 27 è una vista simile alla figura 26, volta ad esemplificare un principio di funzionamento di un trasduttore piezoelettrico di una base di supporto sensorizzata del tipo mostrato in figura 24;

- le figure 28, 29 e 30 sono rappresentazioni schematiche simili quelle delle figure 25, 26 e 27, relative ad una base di supporto sensorizzata realizzata in accordo a terze possibili forme di attuazione dell'invenzione;

- la figura 31 è una sezione schematica di un dispositivo di supporto sensorizzato in accordo ad altre possibili forme di attuazione dell'invenzione, assicurato meccanicamente ad una generica struttura di montaggio; e

- la figura 32 è un dettaglio in scala maggiore di figura 31.

Descrizione particolareggiata di forme di attuazione preferite dell'invenzione

Il riferimento ad "una forma di attuazione", a "varie forme di attuazione" e simili, all'interno di questa descrizione sta ad indicare che almeno una particolare configurazione, struttura, o caratteristica descritta in relazione ad una forma di attuazione è compresa in almeno una forma di attuazione. Quindi, frasi come "in una forma di attuazione", "in un'attuazione", "in varie forme di attuazione" e simili, eventualmente presenti in diversi luoghi di questa descrizione, non sono necessariamente riferite alla stessa forma di attuazione, ma possono invece riferirsi a differenti forme di attuazione. Inoltre, particolari conformazioni, strutture o caratteristiche definite all'interno di questa descrizione possono essere combinate in ogni modo adeguato in una o più forme di attuazione, anche differenti da quelle raffigurate. I riferimenti numerici e spaziali (quali "superiore", "inferiore", "alto", "basso", "fronte", "retro", "verticale", eccetera) qui utilizzati, particolarmente in riferimento agli esempi nelle figure, sono soltanto per comodità e non definiscono dunque l'ambito di tutela o la portata delle forme di attuazione. Nella presente descrizione e nelle allegate rivendicazioni, nel termine generico "materiale" debbono intendersi comprese anche miscele, composizioni o abbinamenti di più materiali differenti. Nella presente descrizione e nelle allegate rivendicazioni, nel termine generico "forza" o "sforzo" debbono intendersi comprese anche grandezze fisiche vettoriali, preferibilmente di tipo dinamico, determinate da sollecitazioni meccaniche e/o vibrazioni e/o pur minimi movimenti o spostamenti di almeno una parte soggetta a rilevazione. Nelle figure sono utilizzati medesimi numeri di riferimento per indicare elementi analoghi o tra loro tecnicamente equivalenti.

Nelle figure 1-8, con 1 è indicato nel suo complesso un dispositivo di supporto sensorizzato per cuscinetti in accordo a possibili forma di attuazione dell'invenzione; nelle figure 1-4, il dispositivo 1 è mostrato in una condizione installata, ovvero assicurato ad una generica struttura di montaggio, indicata con S, mentre nelle figure 5-

8 il dispositivo 1 è mostrato isolatamente.

Il dispositivo 1 include un alloggiamento o supporto di cuscinetto 2, ad esempio formato in materiale metallico o in materiale polimerico, o loro combinazioni, avente una porzione centrale di alloggiamento 2a e due porzioni laterali di fissaggio 2b.

Nella porzione centrale 2a è definita una sede 2c per un cuscinetto, indicato complessivamente con 3, ad esempio comprendente un anello interno, un anello esterno ed una pluralità di componenti di rotolamento interposti, con una eventuale gabbia. La struttura dei cuscinetti utilizzabili in abbinamento al dispositivo di supporto sensorizzato 1 può in ogni caso essere di qualunque concezione nota e prescinde dalle finalità dell'invenzione. Il cuscinetto 3 può essere assicurato nella relativa sede 2c tramite idonei complementi di montaggio 3a; in ogni caso, anche le modalità di montaggio del cuscinetto 3 nell'alloggiamento o supporto 2 prescindono dall'invenzione, potendo essere di qualsiasi concezione nota. Come rilevabile anche dalle figure 5-9, le porzioni laterali 2b dell'alloggiamento 2 sono conformate sostanzialmente in guisa di staffe o occhielli, particolarmente aventi un foro centrale A per rispettivi organi di fissaggio rispetto a corrispondenti fori alla struttura di montaggio S; nell'esempio non limitativo, tali organi di fissaggio, preferibilmente dei bulloni, comprendono due viti V con testa cava esagonale, e rispettivi dadi N.

Il dispositivo di supporto sensorizzato 1 comprende ulteriormente una base di supporto sensorizzata 4 che, nell'esempio non limitativo mostrato, è destinata ad essere operativamente interposta tra l'alloggiamento 2 e la struttura di montaggio S. La base di supporto sensorizzata 4 può essere interposta solo in parte tra l'alloggiamento 2 e la struttura di montaggio S. In altre forme di attuazione, tra la base 4, da un lato, e l'alloggiamento 2 o la struttura S, dall'altro lato, può essere è prevista l'interposizione di altri elementi.

La base di supporto sensorizzata 4 è provvista di mezzi sensori di sforzo (ovvero atti a rilevare sollecitazioni meccaniche e/o vibrazioni e/o movimenti o spostamenti dell'alloggiamento di cuscinetto 2 rispetto alla struttura di montaggio S), in seguito descritti, ed a tale scopo ad essa è preferibilmente associato un cavo multipolare 5 per il trasporto di segnali elettrici, all'estremità distale del quale è di preferenza previsto un connettore di collegamento 5a, ad esempio per il collegamento ad un sistema di

controllo esterno, non rappresentato.

La base 4 è preferibilmente destinata ad essere assicurata in una posizione sostanzialmente stazionaria rispetto all'alloggiamento 2, onde rilevare sforzi applicati a quest'ultimo. Più in generale, la base 4 è preferibilmente interposta almeno in parte tra l'alloggiamento 2 e la struttura di montaggio S in modo tale per cui i suoi mezzi sensori di sforzo siano suscettibili di rilevare vibrazioni e/o movimenti o spostamenti relativi tra l'alloggiamento di cuscinetto 2 e la struttura di montaggio S, oppure spostamenti relativi tra la stessa base 4 e l'alloggiamento di cuscinetto 2 o la struttura di montaggio S.

In varie forme di attuazione, la base 4 ha una regione centrale 4a in cui sono presenti i relativi mezzi sensori di sforzo, quali ad esempio quelli indicati con 10_1, 10_2 e 20 in figura 7, nonché relative piste di collegamento elettrico T. Come si vedrà, conformemente all'invenzione, i suddetti mezzi sensori di sforzo associati alla base 4 comprendono almeno un trasduttore piezoelettrico, in particolare del tipo atto a generare una differenza di potenziale o tensione elettrica e/o una corrente elettrica a fronte di sforzi e/o sollecitazioni meccaniche e/o vibrazioni, quali variazioni della forza o sforzo che agisce su detti mezzi sensori o trasduttore.

Nell'esempio illustrato, le piste conduttive di collegamento T terminano in piazzole P a cui sono elettricamente associati rispettivi terminali di collegamento C; tali terminali C essendo configurati per l'accoppiamento con un connettore 5b previsto all'estremità prossimale del cavo 5.

In varie forme di attuazione, il corpo 4' della base 4 presenta due regioni di estremità opposte, configurate per il posizionamento rispetto al lato inferiore del supporto 2. Nell'esempio illustrato, tali due regioni di estremità, indicate con 4b, hanno elementi di posizionamento rappresentati da rispettive aperture passanti B, in cui sono destinate ad impegnarsi corrispondenti parti in rilievo della faccia inferiore dell'alloggiamento 2. Tali parti in rilievo, indicate con 2d ad esempio in figura 9, sono definite in corrispondenza delle porzioni laterali 2b del supporto 2 e sono attraversate assialmente da relative porzioni dei fori A; nell'esempio i passaggi B e le parti in rilievo 2d hanno un profilo circolare sostanzialmente complementare, ma sono ovviamente possibili altre forme geometriche (ad esempio fori A e passaggi B con profilo quadrangolare o poligonale). In aggiunta o in alternativa ai passaggi B e/o alle parti in

rilievo 2d, il corpo 4' e l'alloggiamento 2 potrebbero includere elementi di posizionamento di altro tipo.

Dalla figura 9 si nota altresì come, in varie forme di attuazione preferenziali, la faccia inferiore dell'alloggiamento 2 presenti un bordo perimetrale 2e sporgente in basso, avente un profilo preferibilmente sostanzialmente complementare al profilo periferico della base di supporto 4. Il bordo inferiore 2e dell'alloggiamento delimita una sede, indicata con 6 in figura 9, nell'ambito della quale è almeno parzialmente alloggiata la base 4, con almeno una superficie di rilevazione di quest'ultima – indicata con 4c ad esempio nelle figure 7 e 8 – che è almeno localmente definita dai suddetti mezzi sensori di sforzo. In varie forme di attuazione la superficie di rilevazione 4c è almeno localmente a contatto con la superficie di fondo 6a (figura 9) di tale sede 6, ad esempio in corrispondenza della parte o delle parti della sua superficie 4c definite dai mezzi sensori sforzo. In altre forme di attuazione, tra la superficie di rilevazione 4c e la superficie di fondo 6a della sede 6 è interposto almeno un ulteriore elemento o un materiale (ad esempio uno strato di resina), comunque atto a trasmettere le sollecitazioni meccaniche dall'alloggiamento 2 alla base 4, ovvero ai relativi mezzi sensori. Di preferenza, e come si nota ad esempio nelle figure 3 e 4, la profondità della sede 6 (ovvero l'altezza del bordo 2e) è minore rispetto allo spessore della base di supporto 4, di modo che la superficie di fondo 6a di tale sede 6 sia effettivamente a contatto con la superficie di rilevazione 4c della base 4, almeno in corrispondenza dei mezzi sensori di sforzo.

In varie forme di attuazione, nella condizione assemblata del dispositivo 1 una superficie della base 4 opposta alla superficie di rilevazione 4c, quale la superficie indicata con 4d in figura 9, risulta in appoggio (direttamente o con interposizione di altro eventuale elemento, ad esempio un adesivo o un coperchio inferiore) su una corrispondente superficie (superiore) Sa della struttura di montaggio S, mentre sulla superficie di rilevazione 4c della base 4 risulta in appoggio (direttamente o con interposizione di altro eventuale elemento, ad esempio un adesivo o una resina) la superficie di fondo 6a della sede 6 dell'alloggiamento.

Ancora in figura 9 si nota come, in varie forme di attuazione, l'alloggiamento di cuscinetto 2 definisca una sede 2f atta a ricevere almeno parzialmente il connettore 5b o

un elemento di tenuta o di trattenimento del cavo 5, tale sede 2f essendo aperta sia in corrispondenza di una superficie laterale dell'alloggiamento 2, sia in corrispondenza della superficie di fondo 6a della sede 6.

In figura 10 è illustrata, a mero scopo esemplificativo, una porzione centrale 4a di una base di supporto sensorizzata 4 avente una disposizione dei relativi mezzi sensori di sforzo 10 e 20 diversa da quella visibile in figura 7, ma realizzata secondo i medesimi concetti.

In varie forme di attuazione, la base 4 realizza essenzialmente un substrato, preferibilmente ma non necessariamente di forma sostanzialmente planare, avente una lunghezza, una larghezza ed uno spessore che si estendono nelle direzioni indicate L, W e H, rispettivamente, in figura 10; tali direzioni L, W e H saranno in seguito anche identificate rispettivamente come direzione longitudinale, direzione trasversale e direzione assiale, riferendosi al piano della base 4. La base 4 può avere indicativamente uno spessore compreso tra 0,5 e 4 mm.

La base 4 comprende un corpo, indicato con 4' solo nelle figure 7-9, che può essere formato con materiale elettricamente isolante (ad esempio un materiale ceramico) o con un materiale elettricamente conduttivo rivestito almeno in parte con un materiale elettricamente isolante, ad esempio in metallo o con una lega metallica (ad esempio acciaio), e ricoperto con uno strato di materiale dielettrico (ad esempio un polimero o un ossido metallico o miscele di ossidi), oppure formato con un materiale o un ossido ceramico o miscele di ossidi ceramici (ad esempio allumina o miscele di allumina e zirconia). Non è tuttavia escluso dall'ambito dell'invenzione l'impiego di altri materiali atti allo scopo.

In corrispondenza di una faccia o superficie maggiore 4c del corpo 4' della base 4 è previsto almeno un primo trasduttore piezoelettrico particolarmente configurato per la rilevazione di sforzi di taglio (*shear stresses*), ovverosia forze che hanno almeno una componente nella direzione longitudinale L e/o nella direzione trasversale W. In varie forme di attuazione, il citato trasduttore è destinato ad essere associato meccanicamente ad un elemento di cui deve essere rilevato uno spostamento o una deformazione - ovverosia l'alloggiamento 2 - ed è suscettibile di generare un segnale elettrico rappresentativo di uno sforzo di taglio determinato da un detto spostamento o

deformazione. In varie forme di attuazione, preferibilmente in corrispondenza della medesima faccia sensorizzata della base 4, può essere previsto almeno un secondo trasduttore piezoelettrico, sostanzialmente della medesima tipologia del primo trasduttore, ma disposto per rilevare sforzi di taglio in direzione diversa rispetto al suddetto primo trasduttore. Un tale caso è appunto esemplificato in figura 7, in cui la base 4 prevede un primo trasduttore piezoelettrico 10_1 specialmente configurato per rilevare sforzi di taglio aventi una componente nella direzione longitudinale L, ed un secondo trasduttore piezoelettrico 10_2 specialmente configurato per rilevare sforzi di taglio aventi una componente nella direzione trasversale W. In varie forme di attuazione, preferibilmente in corrispondenza della medesima faccia sensorizzata della base 4, può essere previsto almeno un ulteriore trasduttore, preferibilmente anch'esso di tipo piezoelettrico, particolarmente configurato per la rilevazione di sforzi normali (*normal stresses*), ovverosia forze che hanno almeno una componente nella direzione assiale H: un tale trasduttore è indicato con 20 nelle figure 7 e 10.

Come accennato, e come risulterà maggiormente chiaro in seguito, in varie forme di attuazione, alla parte superiore di almeno un trasduttore 10, ovverosia la sua parte opposta alla base 4, è destinato ad essere associato o collegato meccanicamente l'alloggiamento 2, che - a seguito di sollecitazioni impartite al cuscinetto 3 o generate da esso - è suscettibile di compiere movimenti o subire deformazioni relativamente alla struttura di montaggio S ed alla base 4: in altri termini, quindi, il cuscinetto 3 trasmette al supporto 2 una forza avente almeno una componente nelle direzioni L e/o W e/o H, della quale si desidera misurare l'entità attraverso uno o più trasduttori piezoelettrici.

Atteso che la parte inferiore del trasduttore 10 è in posizione fissa relativamente alla base 4 (che è a sua volta in posizione stazionaria) e la parte superiore del trasduttore 10 è associata o fissata (ad esempio incollata) all'alloggiamento 2, una forza applicata a quest'ultimo nella direzione W e/o nella direzione L causa una sollecitazione sul trasduttore 10, che - per effetto piezoelettrico - genera ai capi di relativi elettrodi una differenza di potenziale elettrico proporzionale all'entità dello sforzo di taglio applicato. In tal modo risulta possibile disporre di informazioni relative alla direzione della sollecitazione impartita all'alloggiamento 2 dal cuscinetto 3.

L'alloggiamento 2 può essere associato anche alla parte superiore di un

trasduttore piezoelettrico 20, quando all'alloggiamento è suscettibile di essere applicata una forza assiale avente almeno una componente nella direzione H: tale forza assiale causa quindi una corrispondente sollecitazione sul trasduttore 20 che, per effetto piezoelettrico, genera ai capi di relativi elettrodi una differenza di potenziale rappresentativa dell'entità dello sforzo normale applicato.

L'alloggiamento 2 non deve essere necessariamente fissato al trasduttore 20, ma può essere semplicemente sovrapposto ad esso. Peraltro, non è neppure strettamente necessario che l'alloggiamento sia fissato al trasduttore 10, se le due parti in questione sono comunque sovrapposte in appoggio o tra loro aderenti o incastrate, o comunque associate in modo tale da garantire che un movimento o una deformazione dell'alloggiamento 2 nella direzione L e/o W determini una corrispondente sollecitazione sul trasduttore 10. Tuttavia, in accordo a forme di attuazione particolarmente vantaggiose dell'invenzione, tra la superficie di rilevazione 4c della base 4 e la superficie di fondo 6a dell'alloggiamento, particolarmente almeno in corrispondenza dei trasduttori 10 e/o 20, è disposto un sottile strato di resina, o più in generale materiale (ad esempio adesivo) atto a vincolare tra loro le parti in questione e trasmettere ad un trasduttore 10 e/o 20 i pur minimi movimenti nelle varie direzioni dell'alloggiamento 2, ad esempio nella direzione assiale H o nella direzione laterale L e/o W. Il suddetto strato è esemplificato in figura 3, dove è indicato con 7, e può avere uno spessore indicativamente compreso tra 100 nm e 2 mm, preferibilmente compreso tra 10 e 200 micrometri.

La base 4 su cui sono definiti i trasduttori 10 e/o 20, ad esempio serigrafati, viene quindi resinata o provvista di un polimero o un adesivo, preferibilmente per essere solidale con l'alloggiamento 2: la resina 7 trasmette meccanicamente ai trasduttori gli sforzi cui è soggetto l'alloggiamento stesso. Sebbene l'alloggiamento di cuscinetto 2 sia in genere progettato per essere rigido e deformarsi il meno possibile, esso sarà comunque soggetto ad una pur minima deformazione se sottoposto a sforzo: l'estrema sensibilità dei trasduttori piezoelettrici impiegati, in grado di rilevare movimenti nanometrici, permette di rilevare anche queste piccole deformazioni.

In varie forme di attuazione, il trasduttore, o ciascun trasduttore, comprende almeno un elemento o strato di materiale piezoelettrico (in seguito, per semplicità,

"strato piezoelettrico") ed almeno due elettrodi, ciascuno dei quali associato ad una faccia maggiore dello strato piezoelettrico. Di preferenza, gli elettrodi sono definiti da piste di materiale elettricamente conduttivo (in seguito, per semplicità, "piste conduttive"), con tali piste che possono eventualmente definire - alla loro estremità opposta al relativo elettrodo - porzioni terminali di collegamento, ad esempio in forma di piazzole (*pads*). Riferendosi ad esempio alla figura 10, in cui gli strati piezoelettrici del trasduttore 10_1 e del trasduttore 20 sono indicati 11 e con 21, rispettivamente, le lettere "T", "E" e "P" (seguite da relativi numeri di riferimento) identificano le citate piste conduttive, alcuni dei corrispondenti elettrodi e le corrispondenti porzioni terminali o piazzole, rispettivamente. Si noti che gli elettrodi E e le piste T non debbono essere necessariamente formati integralmente: ad esempio, è possibile formare lo strato piezoelettrico 11 o 21 come corpo a sé stante, a forma di piastra o lamina, poi formare gli elettrodi E sulle facce maggiori opposte del relativo strato piezoelettrico 11 o 21, poi formare le piste T con le relative piazzole P sulla faccia sensorizzata 4a della base 4, ed infine assicurare lo strato 11 o 21 recante gli elettrodi E sulla faccia 4a della base 4, realizzando i necessari collegamenti tra gli elettrodi E e le corrispondenti piste T. Questo tipo di soluzione è assimilabile ad un montaggio di componenti elettronici tipo SMD in cui il componente dotato di elettrodi viene posizionato su un circuito elettrico tipo PCB o circuito ibrido e successivamente saldato.

Preferibilmente lo strato piezoelettrico 11 e/o 21, le piste T e gli elettrodi E sono sostanzialmente planari e giacciono sostanzialmente paralleli tra loro e rispetto alla superficie della corrispondente faccia del corpo 4'.

In varie forme di attuazione il trasduttore 10 e/o 20, ovvero lo strato piezoelettrico 11 e/o 21, è formato tramite deposizione di materiale sulla base 4 e/o almeno in parte sugli elettrodi inferiori, ad esempio tramite serigrafia o *spin coating*.

Di preferenza, anche gli elettrodi E, ovvero le piste conduttive T, sono formati impiegando processi di deposizione, ad esempio con tecniche serigrafiche, o di *sputtering*, o di evaporazione termica, o per dispensazione o, più in generale, una qualsivoglia nota tecnica atta al deposito di materiali elettricamente conduttivi su di un relativo substrato.

In varie forme di attuazione preferenziali l'intero trasduttore 10 e/o 20 è ottenuto

tramite deposizione di strati successivi di diversi materiali sulla base 4, ovverosia depositando prima le parti elettricamente conduttive destinate ad essere almeno in parte in corrispondenza della faccia inferiore dello strato 11 e/o 21, poi depositando lo strato piezoelettrico 11 e/o 21, ed infine depositando le parti elettricamente conduttive destinate ad essere almeno in parte in corrispondenza della faccia superiore dello strato 11 e/o 21.

La deposizione a strati sovrapposti avviene di preferenza impiegando tecniche serigrafiche, nel qual caso lo strato piezoelettrico 11 e/o 21 può avere uno spessore compreso tra 20 e 300 micron, preferibilmente circa 100 micron, con gli elettrodi E e le piste T aventi invece uno spessore compreso tra 8 e 25 micron, preferibilmente circa 15 micron. In alternativa, lo strato piezoelettrico (e gli elettrodi E e/o le piste T) può essere depositato impiegando tecniche a film sottile (quali *sol gel*, *sputtering* o *Chemical Vapour Deposition*), nel qual caso lo strato potrà avere uno spessore compreso tra 50 e 2000 nanometri, preferibilmente compreso tra 500 e 800 nanometri (le piste/elettrodi possono avere uno spessore compreso tra 50 e 200 nanometri, preferibilmente compreso tra 80 e 120 nanometri, deposte per sputtering, evaporazione termica o serigrafia con inchiostri metallorganici).

Lo strato 11, o ciascuno strato 11 e/o 21, può essere depositato impiegando paste a base di ceramica piezoelettrica o piezoceramica, mentre gli elettrodi E possono essere ottenuti con paste a base metallica, preferibilmente metalli nobili (ad esempio paste a base di platino, o di argento, o di argento-palladio, o di argento-platino).

Lo strato piezoelettrico, o ciascuno strato piezoelettrico, può essere ottenuto anche con tecniche diverse da quelle sopra esemplificate e/o non necessariamente tramite deposizione o "crescita" di materiale su di un substrato: ad esempio, uno strato piezoelettrico potrebbe essere configurato come un corpo formato con ceramiche piezoelettriche ottenute da compressione di polveri e loro successiva sinterizzazione, sulle due facce superiori del quale vengono successivamente depositati o applicati gli elettrodi E, poi collegati alle relative piste T ottenute invece sulla corrispondente faccia della base 4. Anche in questo caso, come precedentemente descritto, il processo è assimilabile ad un montaggio tipo SMD dell'elemento ceramico piezoelettrico su un PCB o su un circuito ibrido.

In figura 11, un trasduttore 10 è rappresentato schematicamente in esploso. Come si nota, in varie forme di attuazione, lo strato piezoelettrico 11 si estende nella direzione longitudinale L ed ha due facce maggiori opposte 11a e 11b, in corrispondenza delle quali vi sono almeno un primo elettrodo E1 ed un secondo elettrodo E2, rispettivamente. A ciascun elettrodo E1 e E2 è di preferenza associata una relativa pista conduttiva T1 e T2, depositata o comunque ottenuta almeno in parte sulla faccia 4a della base 4, definente una rispettiva piazzola di collegamento P1 e P2.

Una simile realizzazione è mostrata per un trasduttore 20 in figura 12, dove lo strato piezoelettrico 21 ha sagoma circolare, ed alle sue facce maggiori opposte 21a e 21b sono associati rispettivi elettrodi E22 e E23, preferibilmente anch'essi circolari.

Anche a ciascun elettrodo E22 e E23 è associata una relativa pista conduttiva T22 e T23, ottenuta almeno in parte sulla faccia 4c della base 4, definente una rispettiva piazzola di collegamento P22 e P23. Si noti che la forma circolare dello strato piezoelettrico 21 e dei relativi elettrodi E22, E23, per quanto preferibile, non è imperativa.

Come detto, ipotizzando una deposizione a strati sovrapposti del tipo sopra esemplificato per i trasduttori 10 e 20 di figura 10, ad esempio per serigrafia, sulla faccia 4c della base 4 vengono dapprima depositate le piste T2 e T23 che definiscono gli elettrodi E1 e E23 con le relative piazzole P2 e P23; in seguito sulla faccia 4c della base 4 e sulle parti delle piste T2 e T23 che definiscono gli elettrodi E2 e E23 vengono depositati gli strati piezoelettrici 11 e 21, ed infine vengono depositate le piste T1 e T22, con una loro parte (comprensiva delle piazzole P1 e P22) che si estende sulla faccia 4c della base 4, e con la loro parte definente gli elettrodi E1 e E22 che si estende invece sulle facce superiori degli strati piezoelettrici 11 e 21, rispettivamente.

Come detto, in ogni caso, gli elettrodi possono essere configurati come parti formate distinte, sulle facce maggiori opposte di strati 11 e/o 21 precedentemente ottenuti per sinterizzazione o in altro modo, per poi essere collegati elettricamente in fase di montaggio dei trasduttori 10 e 20 sul piastra 4, sul quale sono invece ottenute le piste T1, T2 e T22, T23.

A prescindere dalle modalità di ottenimento, gli elettrodi E1 e E2 sono preferibilmente elettrodi a pettine, intendendo con ciò elettrodi aventi ciascuno almeno

una pluralità di porzioni, o denti, o diti (in seguito, per semplicità "diti") che si estendono in corrispondenza delle due facce maggiori opposte 11a e 11b dello strato piezoelettrico 11, rispettivamente, secondo una direzione di estensione di quest'ultimo, qui la direzione longitudinale L.

Conformemente ad un aspetto preferenziale dell'invenzione, e riferendosi in particolare alla figura 11, un trasduttore piezoelettrico 10 comprende almeno un terzo elettrodo E3 ed almeno un quarto elettrodo E4, anch'essi preferibilmente a pettine, o comune aventi ciascuno una pluralità di diti che si estendono nella direzione longitudinale L in corrispondenza delle due facce maggiori opposte 11a e 11b dello strato piezoelettrico 11, rispettivamente. Ancora in conformità al citato aspetto preferenziale dell'invenzione, i diti del terzo elettrodo E3 sono in configurazione interdigitata o alternata rispetto ai diti del primo elettrodo E1 e i diti del quarto elettrodo E4 sono in configurazione interdigitata o alternata rispetto ai diti F2 del secondo elettrodo E2.

Gli elettrodi E3 ed E4 sono di preferenza formati impiegando la stessa tecnica utilizzata per formare gli elettrodi E1 e E2, e nella medesima fase produttiva. Pertanto, riferendosi ancora al già citato esempio di deposizione a strati sovrapposti tramite tecnica serigrafica, la pista T4 con l'elettrodo E4 sarà formata nella medesima fase di deposizione con la quale si ottengono la pista T2 con l'elettrodo E2 sulla base 4, mentre la pista T3 con l'elettrodo E3 sarà formata nella medesima fase di deposizione con la quale si ottiene la pista T1 con l'elettrodo E1, in parte sullo strato piezoelettrico 11 ed in parte sulla base 4.

Nelle figure 13 e 14 sono esemplificate in forma schematica possibili geometrie degli elettrodi E1 e E3 in corrispondenza della faccia superiore 11a dello strato 11 (figura 13), e degli elettrodi E2 e E4 in corrispondenza della faccia inferiore 11b dello strato 11 (figura 14). Come si evince, nell'esempio non limitativo, tali elettrodi E1-E4 sono elettrodi a pettine, e comprendono quindi una serie di porzioni o denti o diti che preferibilmente si estendono sostanzialmente paralleli tra loro, qui nella direzione longitudinale L dello strato 11, e/o preferibilmente equidistanziati (ovvero ad una distanza reciproca sostanzialmente costante), a partire da rispettive porzioni collettrici o di distribuzione.

Riferendosi ad esempio alle figure 13 e 14, le lettere "D" e "F", seguite dal numero identificativo del relativo elettrodo, indicano appunto le citate porzioni di distribuzione degli elettrodi E, nonché i relativi diti, rispettivamente. Come detto, i diti F degli elettrodi E che si trovano su di una medesima faccia dello strato 11 sono interdigitati. Nella configurazione preferenziale, i diti F di ciascun elettrodo a pettine E sono sostanzialmente rettilinei, ma ciò – per quanto preferibile - non costituisce caratteristica essenziale, i diti potendo avere ad esempio anche un diverso andamento.

Nell'esempio, anche le porzioni di distribuzione D di due elettrodi E che si trovano su di una medesima faccia dello strato 11 sono sostanzialmente parallele tra loro, ma neppure tale caratteristica deve ritenersi essenziale.

In figura 15 è visibile una porzione di una base 4 in corrispondenza della quale si trova un trasduttore 20, come detto comprensivo di un elettrodo superiore E22 ed un elettrodo inferiore E23, tra i quali si trova il relativo strato piezoelettrico 21. Di preferenza, quando il trasduttore 20 è ottenuto tramite deposizione di strati successivi sulla piastra 4, è preferibile che lo strato 21 abbia dimensioni perimetrali (qui la circonferenza) maggiori rispetto a quelle degli elettrodi E22 e E23, i quali sono preferibilmente sostanzialmente uguali tra loro: la maggior dimensione perimetrale dello strato 21 rispetto agli elettrodi E22 e E23 semplifica la sovrapposizione dei vari strati di materiale durante il processo di deposizione, ad esempio tramite serigrafia. Il trasduttore 20 opera essenzialmente come sensore di pressione, ovverosia lo strato 21 genera una tensione (o differenza di potenziale elettrico) quando lo strato 21 viene compresso, ovvero quando l'elettrodo superiore E22 viene spinto verso l'elettrodo inferiore E23, ovverosia quando l'alloggiamento di cuscinetto 2 viene spinto sulla base di supporto sensorizzata 4.

In figura 16 è invece visibile una porzione di una base 4 in corrispondenza della quale si trova un trasduttore 10, come detto comprensivo dello stato piezoelettrico 11, con almeno due elettrodi a pettine inferiori (qui non visibili) in configurazione interdigitata o alternata, ed almeno due elettrodi a pettine superiori E1 e E3 in configurazione interdigitata o alternata. L'area dello strato 11 - che può essere ad esempio compresa tra 1 e 600 mm^2 , preferibilmente compresa tra 2 e 100 mm^2 - è tale da ricoprire gli elettrodi inferiori E2, E4, o quanto meno la parte prevalente dei loro diti

F2 e F4.

Dalle viste sezionate di cui alle figure 17-20 si nota come, in varie forme di attuazione, i diti F dei vari elettrodi E siano sostanzialmente simmetrici ed in posizioni reciprocamente affacciate o contrapposte. In particolare, ciascun dito F1 dell'elettrodo superiore E1 è in posizione sostanzialmente sovrapposta o allineata ad un rispettivo dito F2 dell'elettrodo inferiore E2, ed ha preferibilmente forma e dimensioni sostanzialmente uguali a quest'ultimo; similmente, ciascun dito F3 dell'elettrodo superiore E3 è in posizione sostanzialmente sovrapposta o allineata ad un rispettivo dito F4 dell'elettrodo inferiore E4, ed ha preferibilmente forma e dimensioni sostanzialmente uguali a quest'ultimo.

Riferendosi ad esempio alla figura 21, in forme di attuazione di questo tipo, i diti adiacenti F1 e F3 degli elettrodi superiori E1 e E3 si estendono sostanzialmente ad una prima distanza D_1 l'uno dall'altro, mentre la distanza reciproca D_2 tra due diti successivi F1 dell'elettrodo E1, rispettivamente tra due diti successivi F3 dell'elettrodo E3, è sostanzialmente non inferiore al doppio della prima distanza D_1, preferibilmente sostanzialmente pari al doppio della distanza D_1. Dall'altro lato, anche i diti adiacenti F2 e F4 degli elettrodi inferiori E2 e E4 si estendono sostanzialmente alla suddetta prima distanza D_1 l'uno dall'altro, e la distanza reciproca D_2 tra due diti successivi F2 dell'elettrodo E2, rispettivamente tra due diti successivi F4 dell'elettrodo E4, è analogamente sostanzialmente non inferiore al doppio della prima distanza D_1, preferibilmente sostanzialmente pari al doppio della distanza D_1.

Lo strato piezoelettrico 11 è di preferenza formato con un materiale ceramico, quale un PZT (miscela di zirconato e titanato di piombo), che deve preventivamente essere sottoposto ad un processo di polarizzazione, particolarmente quando è necessario ottenere la polarizzazione del materiale piezoelettrico con orientazione diversa da quella di successiva eccitazione meccanica: a tale scopo, tra almeno uno degli elettrodi inferiori E2 e E4, da un lato, ed almeno uno degli elettrodi superiori E1 e E3, dall'altro lato, viene applicato un campo elettrico (indicativamente compreso tra 1 e 5 kV/mm), tale da orientare i dipoli elettrici interni allo strato 11 in un'unica direzione (tale operazione essendo in genere nota come "*poling*"). Come è noto, per l'esecuzione della fase di polarizzazione, il trasduttore 10 - ovvero lo strato 11 – viene normalmente

scaldato ad una determinata temperatura, ad esempio compresa tra i 120° e i 140°C, normalmente comunque inferiore alla temperatura di Curie, che è variabile a seconda del materiale piezoelettrico scelto (si assuma qui il caso di una ceramica piezoelettrica con una temperatura di Curie di circa 350°C). Dopo il raggiungimento di tale temperatura viene applicata la tensione elettrica per un certo lasso di tempo, ad esempio compreso tra 1 e 50 minuti, preferibilmente compreso tra 10 e 20 minuti, tale tensione essendo poi mantenuta anche durante il successivo raffreddamento del materiale, al cessare del riscaldamento.

Giova rammentare che l'effetto piezoelettrico (ossia la capacità di un materiale di fornire una differenza di potenziale quando sollecitato meccanicamente, ovvero di deformarsi se sottoposto ad un campo elettrico), è essenzialmente basato su distorsioni del suo reticolo cristallino. Un tipo molto comune di ceramica piezoelettrica, come il PZT, è contraddistinto da un reticolo cubico a facce centrate quando si trova ad una temperatura superiore alla temperatura di Curie, dove ai vertici di tali facce vi sono atomi metallici (ad esempio piombo), al centro di tali facce vi sono atomi di ossigeno, e al centro del reticolo vi è un atomo più pesante dell'ossigeno (ad esempio titanio, zirconio). Al di sotto della temperatura di Curie il reticolo è tetragonale o romboedrico, a seconda della percentuale relativa di Titanio e Zirconio. Normalmente si utilizzano concentrazioni vicine al 50% dove convivono entrambe le fasi. Potrebbe essere vantaggioso utilizzare composizioni di PZT sbilanciate sul Ti che presentano temperature di Curie superiori, ad esempio di circa il 60% Ti e 40% Zr. Nel caso in cui non vengano superate temperature dell'ordine dei 200°C è comunque consigliabile rimanere in prossimità del confine tra le zone morfotropiche, comprese tra 45% e 55% di concentrazione relativa, preferibilmente per una concentrazione relativa del 52% in Ti. E' inoltre vantaggioso utilizzare droganti, ad esempio Niobio, per migliorare la risposta dei sensori piezoelettrici (concentrazione preferita inferiore al 1% in peso).

L'atomo centrale più pesante può assumere una posizione stabile asimmetrica, causando uno squilibrio nelle cariche che si estrinseca nella formazione di un dipolo elettrico. I materiali piezoelettrici vengono quindi polarizzati mediante un intenso campo elettrico, normalmente supportato da un riscaldamento, che ne orienta i dipoli come desiderato, e provoca una polarizzazione collettiva stabile nei limiti di

sollecitazione meccanica, termica od elettrica del materiale. Al termine del processo di polarizzazione il materiale è distorto nel suo reticolo e reagisce a sollecitazioni, meccaniche o elettriche, col medesimo meccanismo di spostamento di massa e di carica, e generando una variazione di carica sulle sue superfici. Se il materiale non è polarizzato il fenomeno avviene ugualmente ma essendo i vari domini disposti a caso i vari effetti si annullano a vicenda.

La polarizzazione è nel piano dello strato piezoelettrico 11, in direzione alternata tra elettrodi di polarizzazione al potenziale positivo (+) ed al potenziale negativo (-). E' stato recentemente dimostrato come la fase di polarizzazione causi una migrazione delle vacanze di ossigeno verso il polo di polarizzazione a potenziale negativo (si veda ad esempio G. Holzlechner et al, "*Oxygen vacancy redistribution in PbZrxTi1- xO3 (PZT) under the influence of an electric field*", in Solid State Ionics 262:625-629, 2014). E' stato inoltre dimostrato come una maggiore concentrazione di vacanze di ossigeno provochi una riduzione nella polarizzazione della ceramica piezoelettrica (si veda ad esempio A. B, Joshi et al, "*Effect of oxygen vacancies on crystallization and piezoelectric performance of PZT*", in Ferroelectrics Vol 494, 117–122, 2016.

Nel caso specifico qui considerato si avrà quindi una maggiore qualità del materiale piezoelettrico dello strato 11 in prossimità degli elettrodi che, in fase di polarizzazione, sono stati posti al potenziale positivo: per qualità del materiale si intende in questo caso una struttura più ordinata del reticolo cristallino, dovuta ad una minore concentrazione di vacanze di ossigeno o, per converso, ad una maggiore concentrazione di ioni di ossigeno che vanno nel caso ideale ad occupare tutti i siti disponibili O in una forma di cristallo ad esempio del tipo ABO_3 dove nel caso più comune che è quello del PZT corrispondono a piombo (Pb=A), Zirconio o Titanio (B=Zr oppure B=Ti). La polarizzazione del materiale è quindi più intensa in prossimità degli elettrodi collegati al potenziale positivo, ove sono migrati gli ioni ossigeno (negativi), lasciando in prossimità degli elettrodi collegati al potenziale negativo le vacanze di ossigeno (positive).

Conformemente ad un ulteriore aspetto preferenziale dell'invenzione, la polarizzazione dello strato piezoelettrico 11 viene effettuata con una configurazione di collegamento elettrico dei vari elettrodi a pettine superiori ed inferiori che è differente

rispetto alla configurazione di collegamento elettrico dei medesimi elettrodi che viene successivamente utilizzata quando il trasduttore piezoelettrico 10 è impiegato per rilevare uno sforzo di taglio.

Detto in altri termini, lo strato 11 risulta provvisto di elettrodi che servono almeno in parte sia ai fini di una polarizzazione dello strato di materiale piezoelettrico che ai fini di una successiva misura o rilevazione di un segnale elettrico generato dallo stesso strato 11.

La figura 21 schematizza appunto una possibile fase di polarizzazione di un trasduttore 10, ovvero dello strato piezoelettrico 11, nella quale gli elettrodi E1 e E2 sono elettricamente collegati tra loro al potenziale negativo (-), mentre gli elettrodi E3 e E4 sono elettricamente collegati tra loro al potenziale positivo (+), ed elettricamente isolati rispetto agli elettrodi E1 e E2. Gli ioni ossigeno tenderanno quindi a concentrarsi in prossimità delle zone comprese tra i diti F3 e F4, in parte nella zona sottostante gli elettrodi e in parte nella zona senza elettrodi, tra le coppie di diti F3-F4 e F1-F2 nella zona più vicina a F3-F4 carica positivamente, mentre le vacanze di ossigeno tenderanno a concentrarsi in prossimità delle zone comprese tra i diti F1 e F2, in parte nella zona sottostante gli elettrodi e in parte nella zona senza elettrodi, tra le coppie di diti F3-F4 e F1-F2 nella zona più vicina a F1-F2 carica negativamente.

Nella figura 21 le piccole frecce VP al centro dello strato 11 esemplificano i vettori di polarizzazione, determinati dall'applicazione della differenza di potenziale tra gli elettrodi E1 e E3, da un lato, e gli elettrodi E2 e E4, dall'altro lato. Come si evince, l'asse di polarizzazione, indicato con PA, si estende nella direzione W, ovverosia è trasversale alla direzione longitudinale L. Le zone del materiale piezoelettrico che si estendono assialmente (direzione H) tra ciascuna coppia di diti sovrapposti F1-F2 e F3-F4 risultano meno polarizzate rispetto alle zone del materiale che si estendono trasversalmente (direzione W) tra le suddette coppie di diti: ciò è essenzialmente dovuto alla deformazione delle zone polarizzate che si trovano tra le suddette coppie di diti, che tendono ad assottigliarsi ed allungarsi.

La figura 22 illustra invece come, nel successivo impiego del trasduttore 10 ai fini di rilevazione, gli elettrodi E1-E4 vengano sfruttati con una configurazione di collegamento elettrico che è differente rispetto a quella utilizzata in fase di

polarizzazione dello strato 11.

In particolare, gli elettrodi superiori E1 e E3 sono elettricamente collegati tra loro (qui, a puro titolo di esempio, al potenziale positivo +), mentre gli elettrodi inferiori E2 e E4 sono elettricamente collegati tra loro (qui, a puro titolo di esempio, al potenziale negativo -) e sono elettricamente isolati rispetto agli altri due elettrodi E1 e E3. In tal modo, uno sforzo di taglio applicato allo strato piezoelettrico 11 avente almeno una componente nella direzione longitudinale L genera tra gli elettrodi E1 e E3, da un lato, e gli elettrodi E2 e E4, dall'altro lato, una differenza di potenziale la cui entità è sostanzialmente proporzionale allo sforzo di taglio applicato.

La figura 23 è intesa appunto ad evidenziare in modo schematico il comportamento dei vettori di polarizzazione VP, due soli dei quali schematizzati in maggior scala. Quando lo strato 11 viene sottoposto ad uno sforzo di taglio SS avente almeno una componente nella direzione di estensione dei diti F (qui sostanzialmente nella direzione longitudinale L), e quindi sostanzialmente trasversale o perpendicolare all'asse di polarizzazione, si determina in modo anisotropo una rotazione dei vettori VP, che causa la comparsa di una carica tra gli elettrodi superiori E1 e E3 e gli elettrodi inferiori E3 e E4.

Si apprezzerà quindi che, prevedendo sulla base di supporto 4 più trasduttori 10 orientati in modo diverso, risulta possibile rilevare sia l'entità delle sollecitazioni impartite all'alloggiamento 2 dal cuscinetto 3, sia la direzione in cui avvengono tali sollecitazioni. Nel caso esemplificato in figura 7, il trasduttore 10_1 sarà quindi idoneo a rilevare i carichi che intervengono sostanzialmente nella direzione longitudinale L, mentre il trasduttore 10_2 sarà idoneo a rilevare i carichi che intervengono sostanzialmente nella direzione trasversale W (ed il trasduttore 20 sarà idoneo a rilevare i carichi che intervengono nella direzione assiale H). Le forme di attuazione descritte con riferimento alle figure 21-23 - contraddistinte da una disposizione simmetrica tra i diti F1 e F3 degli elettrodi superiori E1 e E3 e i diti F2 e F4 degli elettrodi inferiori E2 e E4, con i diti dei primi sostanzialmente affacciati o sovrapposti ai diti dei secondi - consentono infatti di rilevare deformazioni dello strato 11 che avvengono (o hanno almeno una componente) nella direzione longitudinale L.

Tale tipo di funzionamento è basato sulla asimmetria della polarizzazione

ottenuta a causa della migrazione delle vacanze di ossigeno in precedenza citata: tuttavia, ciò non costituisce caratteristica essenziale dell'invenzione, poiché con differenti posizionamenti relativi tra i diti F e/o differenti configurazioni di collegamento elettrico degli elettrodi E in fase di polarizzazione ed utilizzo possono essere ottenuti modi di funzionamento differenti.

Ad esempio, le figure 24-27 si riferiscono a forme di attuazione contraddistinte da una disposizione asimmetrica tra gli elettrodi superiori E1, E3 e gli elettrodi inferiori E2, E4, ovvero dei relativi diti. Dalla figura 24 si nota come la struttura generale del trasduttore 10 sia sostanzialmente simile a quella già in precedenza descritta, cosi come simili possono essere le modalità di fabbricazione, ad esempio tramite tecniche di deposizione serigrafica a strati sovrapposti. La disposizione dei diti F degli elettrodi E è invece diversa: in particolare, la distanza tra diti adiacenti di due diversi elettrodi è minore della distanza tra due diti successivi di un medesimo elettrodo.

Riferendosi in particolare anche alla figura 25, in varie forme di attuazione di questo tipo, i diti F1 e F3 più prossimi tra loro degli elettrodi superiori E1 e E3 si estendono (qui nella direzione longitudinale L) sostanzialmente ad una prima distanza D_1 l'una dall'altra, mentre la distanza reciproca D_2 tra due diti successivi F1 dell'elettrodo E1 è maggiore del doppio della distanza D_1 (nell'esempio all'incirca il triplo di D_1); anche i diti successivi F3 dell'elettrodo E3 sono sostanzialmente alla distanza D_2 tra loro. Si noti che anche i diti F1 e F3 meno prossimi tra loro degli elettrodi superiori E1 e E3 si estendono ad una distanza reciproca D_3 che è inferiore alla distanza D_2 (nell'esempio all'incirca il doppio di D_1).

Dall'altro lato, i diti F2 e F4 più prossimi tra loro degli elettrodi inferiori E2 e E4 si estendono (qui nella direzione longitudinale L) sostanzialmente alla suddetta prima distanza D_1 l'una dall'altra, e i diti successivi F2 dell'elettrodo E2, rispettivamente i diti successivi F4 dell'elettrodo E4, sono sostanzialmente alla suddetta distanza D_2. Anche i diti F2 e F4 meno prossime tra loro degli elettrodi inferiori E2 e E4 si estendono sostanzialmente alla distanza D_3 l'una dall'altra.

Dalla figura 25 si nota altresì come ciascun dito F1 dell'elettrodo E1 è in posizione sostanzialmente sovrapposta o allineata ad un rispettivo dito F2 dell'elettrodo E2, e ciascun dito F3 dell'elettrodo E3 è in posizione sostanzialmente sovrapposta o

allineata ad un rispettivo dito F4 dell'elettrodo E4.

Anche in questo caso, la polarizzazione dello strato piezoelettrico 11 viene effettuata con una configurazione di collegamento elettrico dei vari elettrodi che è differente rispetto alla configurazione di collegamento elettrico poi elettrodi utilizzata quando il trasduttore piezoelettrico 10 deve rilevare uno sforzo di taglio.

La figura 25 schematizza appunto una possibile fase di polarizzazione del trasduttore 10, ovvero dello strato piezoelettrico 11, nel corso della quale gli elettrodi E1 e E2 sono elettricamente collegati tra loro al potenziale negativo (-), e gli elettrodi E3 e E4 sono elettricamente collegati tra loro al potenziale positivo (+), ed elettricamente isolati rispetto agli altri due elettrodi E1 e E2. Anche in questo caso le frecce VP al centro dello strato 11 esemplificano i vettori di polarizzazione, determinati dall'applicazione della differenza di potenziale tra gli elettrodi E1 e E2, da un lato, e gli elettrodi E3 e E4, dall'altro lato.

La figura 26 illustra invece come, nell'impiego effettivo del trasduttore 10 a fini di rilevazione di uno sforzo di taglio, la configurazione di collegamento elettrico degli elettrodi E1-E4 sia differente da quella utilizzata in fase di polarizzazione dello strato 11. In particolare, gli elettrodi superiori E1 e E3 sono elettricamente collegati tra loro (qui, a puro titolo di esempio, al potenziale positivo +), e gli elettrodi inferiori E2 e E4 sono elettricamente collegati tra loro (qui, a puro titolo di esempio, al potenziale negativo -), ed elettricamente isolati rispetto agli altri due elettrodi E1 e E3.

In questo modo, come esemplificato in figura 27, uno sforzo di taglio SS applicato allo strato 11 trasversalmente alla direzione longitudinale L (ovvero della direzione W) genera tra gli elettrodi E1 e E3, da un lato, e gli elettrodi E2 e E4, dall'altro lato, una differenza di potenziale avente entità proporzionale a tale sforzo di taglio SS. La variazione del vettore di polarizzazione che genera una carica sugli elettrodi può essere visualizzata come una rotazione del vettore di polarizzazione causata dallo sforzo di taglio. La lettura potrebbe avvenire anche collegando solo una coppia di elettrodi sulle facce opposte, ad esempio gli elettrodi E1 e E2.

Come si intuisce, quindi, prevedendo sulla base 4 un primo trasduttore 10 secondo le figure 16-22 ed un secondo trasduttore 10 secondo le figure 24-27, ma con i rispettivi diti F tutti orientati nella direzione longitudinale L, sarà comunque possibile

rilevare sia i carichi che intervengono sostanzialmente nella direzione longitudinale L (tramite il primo trasduttore), sia i carichi che intervengono sostanzialmente nella direzione trasversale W (tramite il secondo trasduttore).

Le figure 28-30 si riferiscono ad altre forme di attuazione, contraddistinte da una disposizione asimmetrica tra gli elettrodi superiori E1, E3 e gli elettrodi inferiori E2, E4, ovvero dei relativi diti F, in particolare, una disposizione dove i diti di almeno uno degli elettrodi superiori E1, E3 sono sfalsati rispetto ai diti di almeno uno degli elettrodi inferiori E2, E4 nella direzione W.

La struttura generale del trasduttore 10 è sostanzialmente simile a quella illustrata con riferimento alle figure precedenti, a parte la succitata disposizione sfalsata, cosi come simili possono essere le modalità di fabbricazione, ad esempio tramite tecniche di deposizione serigrafica a strati sovrapposti. Dalle figure 28-30 si evince infatti la diversa disposizione dei diti F degli elettrodi E: anche in questo caso la distanza tra i diti adiacenti di due diversi elettrodi è minore della distanza tra due diti successivi di un medesimo elettrodo, ma i diti F di un elettrodo superiore sono almeno in parte in posizione sfalsata rispetto ai diti di un elettrodo inferiore.

Riferendosi in particolare alla figura 28, in varie forme di attuazione di questo tipo i diti F1 e F3 più prossimi tra loro degli elettrodi superiori E1 e E3 si estendono (qui nella direzione longitudinale L) sostanzialmente ad una prima distanza D_1 l'una dall'altra, mentre la distanza reciproca D_2 tra due diti successivi F1 dell'elettrodo E1 è maggiore del doppio della distanza D_1 (nell'esempio all'incirca il triplo di D_1); anche i diti successivi F3 dell'elettrodo E3 sono sostanzialmente alla distanza reciproca D_2. Si noti che anche i diti F1 e F3 meno prossimi tra loro degli elettrodi superiori E1 e E3 si estendono ad una distanza reciproca D_3 che è inferiore alla distanza D_2 (nell'esempio all'incirca il doppio di D_1). Dall'altro lato, i diti F2 e F4 più prossimi tra loro degli elettrodi inferiori E2 e E4 si estendono (qui nella direzione longitudinale L) sostanzialmente alla prima distanza D_1 l'una dall'altra, e i diti successivi F2 dell'elettrodo E2, rispettivamente i diti successivi F4 dell'elettrodo E4, sono sostanzialmente alla distanza D_2. Anche i diti F2 e F4 meno prossimi tra loro degli elettrodi inferiori E2 e E4 si estendono sostanzialmente alla distanza D_3 l'una dall'altra.

Ciò che differenzia la disposizione delle figure 28-30 da quella delle figure 21-

22 e 25-27 è che ciascun dito F3 dell'elettrodo superiore E3 è in posizione sfalsata rispetto ad un rispettivo dito F4 dell'elettrodo inferiore E4, e ciascun dito F1 dell'elettrodo superiore E1 è in posizione sfalsata rispetto ad un rispettivo dito F2 dell'elettrodo inferiore E2, preferibilmente con ciascun dito F1 dell'elettrodo superiore E1 in posizione sostanzialmente sovrapposta o allineata ad un rispettivo dito F4 dell'elettrodo inferiore E4. Più in generale, ciascun dito F di uno fra i due elettrodi superiori E1 e E3 è in posizione sostanzialmente sovrapposta o allineata ad un rispettivo dito F di uno fra i due elettrodi inferiori E2 e E4, mentre ciascun dito F dell'altro fra i due elettrodi superiori E1 e E3 è in posizione sostanzialmente sfalsata rispetto ad un rispettivo dito F dell'altro fra i due elettrodi inferiori E2 e E4: come detto, nell'esempio illustrato, i diti F1 dell'elettrodo superiore E1 sono in posizione sovrapposta o allineata rispetto ai diti F4 dell'elettrodo inferiore E4, mentre i diti F3 dell'elettrodo superiore E3 sono in posizione sfalsata rispetto di diti F2 dell'elettrodo inferiore E2.

Anche in questo caso, la polarizzazione dello strato piezoelettrico 11 viene effettuata con una configurazione di collegamento elettrico dei vari elettrodi che è differente rispetto alla configurazione utilizzata quando il trasduttore piezoelettrico 10 è impiegato per rilevare uno sforzo di taglio.

La figura 28 schematizza appunto la fase di polarizzazione del trasduttore 10, ovvero dello strato piezoelettrico 11, nel corso della quale i quattro elettrodi E1, E2, E3 e E4 sono elettricamente isolati tra loro e la differenza di potenziale è applicata tra uno dei due elettrodi superiori - qui l'elettrodo E3, posto a potenziale positivo (+), ed uno tra i due elettrodi inferiori - qui l'elettrodo E2, posto a potenziale negativo (-), dove i due elettrodi ai quali è applicata la differenza di potenziale sono preferibilmente quelli i cui diti F sono in posizione reciprocamente sfalsata (qui i diti F3 e F2 degli elettrodi E3 e E2). Di nuovo, le frecce VP al centro dello strato 11 esemplificano i vettori di polarizzazione, determinati dall'applicazione della differenza di potenziale tra gli elettrodi E3 e E2. Si otterrebbe un segnale relativo allo sforzo di taglio anche polarizzando tra gli elettrodi E1 ed E4 e poi misurando la deformazione tra E3 ed E2, ma si avrebbe un maggior effetto sul segnale dalla compressione normale che si vuole invece in generale disaccoppiare.

I vettori di polarizzazione VP possono avere differente valore a fronte di una

differente distanza tra i diti F3 degli elettrodi E3 posti a potenziale positivo (+), e rispettivi diti F2 degli elettrodi inferiori E2 posti a potenziale negativo (-); lo strato 11 può avere zone con differente polarizzazione.

La figura 29 illustra invece come, nell'impiego effettivo del trasduttore 10, gli elettrodi E1-E4 vengano collegati elettricamente in una configurazione differente rispetto a quella utilizzata in fase di polarizzazione dello strato 11. In particolare, i quattro elettrodi E1, E2, E3 e E4 sono sempre elettricamente isolati tra loro, e tra gli elettrodi E1 e E4 viene rilevata la differenza di potenziale indotta nello strato 11 a seguito di uno sforzo di taglio (nell'esempio non limitativo illustrato, l'elettrodo E1 rileva il potenziale negativo - e l'elettrodo E4 rileva il potenziale positivo +). Si apprezzerà quindi che, di preferenza, gli elettrodi E impiegati ai fini della rilevazione di uno sforzo di taglio sono gli elettrodi i cui diti sono in posizione sostanzialmente sovrapposta o allineata.

In questo modo, come esemplificato in figura 30, uno sforzo di taglio SS applicato allo strato 11 trasversalmente alla direzione longitudinale L genera tra gli elettrodi E1 e E4 una differenza di potenziale avente entità proporzionale a tale sforzo di taglio SS. La variazione del vettore di polarizzazione che genera una carica sugli elettrodi può essere visualizzata come una rotazione del vettore di polarizzazione causata dallo sforzo di taglio.

In vari esempi di attuazione in precedenza descritti, allo strato piezoelettrico 11 sono associati due elettrodi a pettine superiori E1 e E3 e due elettrodi a pettine inferiori E2 e E4: tuttavia, in altre forme di attuazione, il numero di elettrodi a pettine potrebbe essere maggiore e/o il numero di elettrodi e/o di diti superiori potrebbe essere diverso dal numero di elettrodi e/o di diti inferiori.

Naturalmente anche lo strato piezoelettrico 21 di un trasduttore 20 deve essere preventivamente sottoposto a polarizzazione. Nel caso dello strato piezoelettrico 21 il relativo asse di polarizzazione PA si estende in una direzione trasversale (H) ad un piano identificato dallo strato 21, come indicato in figura 15: in questo caso gli elettrodi impiegati in fase di lettura coincidono con quelli utilizzati in fase di polarizzazione.

Come in precedenza indicato - si veda ad esempio la figura 7 - alla base di supporto sensorizzata 4 è preferibilmente associato un cavo 5 per il collegamento

elettrico ad un sistema esterno. Il connettore 5b del cavo 5 ha un rispettivo corpo connettore che è associato meccanicamente ad almeno uno tra l'alloggiamento 2 e la base 4, e che è configurato per l'accoppiamento con i terminali C (vedere figure 7 e 8), aventi ciascuno un'estremità in contatto elettrico con una rispettiva piazzola P prevista sulla piastra 4. La figura 7 esemplifica il caso di dieci terminali C, ma evidentemente tale numero dipende dal numero e dal tipo di trasduttori piezoelettrici previsti (a due o quattro o sei elettrodi E, eccetera), eventualmente con alcuni collegamenti in comune. Il cavo 5, coi connettori 5a e 5b, può essere sfruttato con vantaggio per il collegamento ad una attrezzatura di produzione impiegata ai fini dell'esecuzione della polarizzazione, ossia con una prima configurazione di collegamento elettrico in conformità con quanto in precedenza descritto; in seguito, all'atto dell'installazione del dispositivo 1, il medesimo cavo 5 potrà essere sfruttato per il collegamento elettrico dei trasduttori 10 e/o 20 ad un sistema esterno che utilizza le corrispondenti rilevazioni, con una seconda configurazione di collegamento elettrico in conformità con quanto in precedenza descritto.

In varie forme di attuazione la base di supporto sensorizzata è installata in una configurazione capovolta rispetto a quella in precedenza esemplificata, ovverosia con la sua superficie di rilevazione in appoggio sulla struttura di montaggio S, direttamente o tramite interposizione di almeno un ulteriore elemento. Anche in questo caso la base 4 è preferibilmente interposta almeno in parte tra l'alloggiamento 2 e la struttura di montaggio S.

In varie forme di attuazione di questo tipo, nella condizione assemblata del dispositivo 1, sulla superficie 4d della base 4 opposta alla superficie di rilevazione 4c è in appoggio (direttamente o con interposizione di altro eventuale elemento) una superfici inferiore dell'alloggiamento, ad esempio la superficie di fondo 6a della sede 6; dall'altro lato, la superficie di rilevazione 4c della base risulta in appoggio (direttamente o con interposizione di altro eventuale elemento) sulla superficie Sa della struttura S.

Una forma di attuazione di questo tipo è esemplificata nelle figure 31 e 32, in cui la base 4 è disposta nell'ambito della sede 6, con la sua superficie 4d a contatto con la superficie di fondo 6a della suddetta 6; anche in questo caso, tra le due superfici 4d e 6a può comunque essere interposto un ulteriore elemento, ad esempio uno strato di resina.

Preferibilmente, la base 4 è in posizione sostanzialmente fissa relativamente all'alloggiamento 2.

La superficie di rilevazione 4c della base, ovvero l'almeno un mezzo sensore 10 e/o 20, è invece in appoggio su di un elemento intermedio, qui costituito da un coperchio inferiore 7' dell'alloggiamento 2, che è a sua volta in appoggio sulla superficie Sa della struttura S, con tale coperchio che chiude inferiormente la sede 6, quando tale sede è prevista. Un simile coperchio inferiore potrebbe essere presente anche nelle forme di attuazione in precedenza descritte.

Il coperchio inferiore 7' può essere montato in posizione fissa relativamente alla struttura S e/o suscettibile di spostamento relativo rispetto all'alloggiamento di cuscinetto 2, ad esempio prevedendo un elemento cedevole 7" (quale una guarnizione perimetrale) tra l'alloggiamento 2 e il coperchio 7' . Il coperchio 7' potrebbe peraltro anche essere solidale all'alloggiamento 2, ad esempio saldato ad esso lungo i bordi, ma essere comunque leggermente flessibile nella zona dei mezzi sensori. In luogo del coperchio 7' potrebbe comunque essere previsto uno strato di resina, o di un collante, o di una resina. In ogni caso, anche in questo caso la disposizione è tale per cui i mezzi sensori di sforzo della base 4 siano suscettibili di rilevare vibrazioni e/o movimenti o spostamenti relativi tra l'alloggiamento di cuscinetto 2 e la struttura di montaggio S o il coperchio 7', oppure spostamenti relativi tra la base 4 e l'alloggiamento di cuscinetto 2 o il coperchio 7' o la struttura di montaggio S.

Si apprezzerà che il funzionamento del dispositivo di supporto sensorizzato 1 delle figure 31-32 è concettualmente analogo a quello già in precedenza descritto.

Da quanto descritto si evince come la realizzazione ed il funzionamento del dispositivo di supporto sensorizzato in accordo all'invenzione siano semplici ed affidabili.

Come si è visto, sulla base di supporto sensorizzata sono di preferenza previsti più trasduttori piezoelettrici: a differenza dei sensori piezoresistivi, che debbono essere alimentati elettricamente e che consentono di rilevare solo generiche deformazioni, i trasduttori piezoelettrici previsti in accordo all'invenzione non necessitano di alimentazione elettrica e consentono di rilevare anche i versi degli sforzi. I trasduttori piezoelettrici previsti in accordo all'invenzione consentono di ottenere segnali con

differenza di potenziale o tensione elettrica relativamente elevata pur a fronte di minime deformazioni, a differenza dei sensori piezoresistivi, che necessitano deformazioni relativamente elevate per indurre variazioni di resistenza significative e conseguentemente significative variazioni di tensione elettrica (per tale ragione i sensori piezoresistivi necessitano tipicamente di complessi mezzi di amplificazione meccanica).

I trasduttori possono essere opportunamente distribuiti a seconda delle necessità di rilevazione, e comprendere ad esempio due trasduttori atti a rilevare forze di taglio disposti tra loro ortogonali, in particolare per rilevare forze in due versi paralleli al piano di montaggio S (direzioni L e W), ed eventualmente un trasduttore piezoelettrico di pressione, in particolare per rilevare forze in verso ortogonale al piano di appoggio (direzione H). In linea di principio, con un trasduttore di sforzo normale del tipo indicato con 20 e due trasduttori di sforzo di taglio del tipo indicato con 10 (ad esempio due trasduttori 10_1 e 10_2 uguali tra loro ma orientati a 90° l'uno dall'altro, come in figura 7) è possibile ricostruire una mappatura tridimensionale delle sollecitazioni cui è sottoposto il cuscinetto. I trasduttori piezoelettrici proposti consentono di rilevare deformazioni estremamente limitate, dell'ordine dei nanometri: non è quindi necessario che l'alloggiamento di cuscinetto si muova in modo significativo.

Vantaggio sostanziale della soluzione preferita è infatti rappresentato dal fatto che il sistema di rilevazione proposto consente di rilevare sollecitazioni nei cuscinetti, particolarmente cuscinetti a rotolamento, distinguendo anche una direzionalità nella sollecitazione stessa. A questo riguardo va rilevato che la tradizionale diagnostica dei cuscinetti a rotolamento può anche essere effettuata rilevando generiche vibrazioni dell'alloggiamento del cuscinetto, senza poterne però individuare la direzionalità spaziale: sebbene il livello complessivo della vibrazione possa essere utilizzato per valutare il deterioramento del cuscinetto, in particolare per rilevare guasti non ciclici, esso può non essere sufficiente per individuare guasti o utilizzi non corretti in una fase iniziale. I guasti ciclici, che si possono verificare nell'anello interno, nell'anello esterno, nei corpi volventi o nella gabbia del cuscinetto, producono componenti della vibrazione a frequenze specifiche. Queste frequenze sono funzione della geometria dei cuscinetti e della velocità di rotazione e possono essere individuati mediante una analisi delle vibrazioni nel dominio delle frequenze. La soluzione preferenziale proposta in accordo

all'invenzione permette di aggiungere a questo tipo di analisi la direzionalità spaziale, individuando ad esempio un carico applicato in modo non corretto.

Una analisi spettrale in più dimensioni effettuata in tempo reale, con un dispositivo di supporto sensorizzato in accordo all'invenzione, può risultare particolarmente utile onde disporre di informazioni sulla dinamica di un sistema meccanico associato ad un cuscinetto, ad esempio in un autoveicolo (un sistema di controllo stabilità, un sistema frenante, eccetera) o in altri ambiti (azionamenti con motore elettrico, apparti industriali, apparati elettrodomestici, eccetera).

Un altro vantaggio del dispositivo e della base di supporto sensorizzata descritti, in accordo a forme di attuazione preferenziali, è rappresentato dal fatto che l'almeno un trasduttore di sforzi di taglio può essere predisposto sin dall'inizio con una determinata struttura degli elettrodi, che viene sfruttata sia in fase produttiva, a fini di polarizzazione del materiale, in una prima configurazione di collegamento elettrico, e successivamente sfruttata anche nel corso dell'impiego finale a fini di rilevazione, in una seconda configurazione di collegamento elettrico. In tal modo si evita il problema di dover realizzare in una prima fase di fabbricazione gli elettrodi di polarizzazione, ed in una successiva fase di fabbricazione gli elettrodi di rilevazione, ovverosia non è necessario ricorre a complicati montaggi e sostituzioni di elettrodi tipici invece della tecnica nota (si veda ad esempio Marcelo Areias Trindade et al, "*Evaluation of effective material properties of thickness-shear piezoelectric macro-fibre composites*", in Proceedings of COBEM 2011, 21st International Congress of Mechanical Engineering, October 24-28, 2011, Natal, RN, Brasile). L'invenzione consente quindi anche di ottenere una semplificazione delle attrezzature e/o dei processi produttivi.

Il processo preferito di ottenimento dell'almeno un trasduttore di sforzi di taglio, basato sulla deposizione successiva di strati di materiale, preferibilmente con tecniche serigrafiche, consente di realizzare in modo semplice e a basso costo una base di supporto sensorizzata molto compatta, con una miniaturizzazione dei relativi mezzi sensori.

E' chiaro che numerose varianti sono possibili per la persona esperta del ramo al dispositivo descritto come esempio, senza per questo uscire dall'ambito dell'invenzione così come definita dalle rivendicazioni che seguono. E' parimenti chiaro che singole

caratteristiche descritte con riferimento a forme di attuazione precedentemente descritte possono essere combinate tra loro in altre forme di attuazione.

Come accennato, la forma sostanzialmente rettilinea dei diti F, per quanto preferibile, non costituisce caratteristica essenziale. I diti potrebbero infatti avere uno sviluppo contraddistinto da tratti curvi e/o angolati rispetto alla direzione longitudinale L, quali elettrodi a forma di "S" o a zig-zag.

Le distanze citate negli esempi precedentemente forniti, quali le distanze D_1 e/o D_2 e/o D_3, debbono intendersi preferenziali ma non limitative, ovvero le distanze tra i diti degli elettrodi e/o il relativo allineamento o sfalsamento potrebbero essere diversi da quelli raffigurate a titolo esemplificativo. Negli esempi non limitativi forniti la polarizzazione e le rilevazioni di sforzo di taglio sono state descritte in riferimento ai diti F che si estendono in uno stesso verso (qui la direzione longitudinale L). Tuttavia, anche altre porzioni degli elettrodi E potrebbero contribuire alla rilevazione, quali ad esempio le porzioni D degli elettrodi che uniscono i diti F, particolarmente nel caso di sforzi di taglio aventi almeno una componente nella direzione di estensione dei diti (come nel caso di figura 23). Più in generale, in varie forme di attuazione, gli elettrodi E potranno prevedere sia delle prime porzioni F che si estendono in un primo verso (qui il verso della lunghezza L), che delle seconde porzioni D che si estendono in un verso trasversale rispetto alle suddette prime porzioni F (qui il verso della larghezza W), con le citate porzioni D ed F degli elettrodi E che possono partecipare alla polarizzazione e/o alla misura.

Gli elettrodi potrebbero essere conformati in modo da estendersi, invece che in almeno una tra una direzione longitudinale (L) e una direzione in larghezza (W) dello strato di materiale piezoelettrico 11, in una direzione angolata o diagonale rispetto a tali direzioni longitudinale o di larghezza.

In varie forme di attuazione preferite del dispositivo di supporto sensorizzato in accordo all'invenzione, i segnali generati dall'almeno un sensore piezoelettrico previsto sono forniti direttamente al relativo connettore elettrico, per essere rilevati da un sistema esterno (ad esempio una centralina di controllo), in tal modo evitando di dover alimentare elettricamente il dispositivo. Tuttavia, in altre possibili attuazioni, la base di supporto sensorizzata o il dispositivo di supporto che la comprende può includere una

disposizione circuitale (ad esempio sulla stessa base sensorizzata), ad esempio per l'amplificazione e/o l'elaborazione e/o la trasmissione dei segnali; in tal caso la suddetta disposizione circuitale comprenderà di preferenza un relativo stadio di alimentazione elettrica per i componenti di amplificazione e/o elaborazione e/o trasmissione, fermo restando comunque che l'almeno un sensore piezoelettrico previsto sulla base sensorizzata non necessita comunque di alimentazione elettrica.

Le indicazioni che seguono riguardano realizzazioni preferite dei trasduttori piezoelettrici comprendenti almeno quattro elettrodi in precedenza descritti:

1. Un trasduttore piezoelettrico in cui le porzioni o diti (F1, F3) del primo e del terzo elettrodo (E1, E3) si estendono almeno nella direzione longitudinale (L) sostanzialmente ad una prima distanza (D_1) l'uno dall'altro, e le porzioni o diti (F1) del primo elettrodo (E1), rispettivamente le porzioni o diti (F3) del terzo elettrodo (E3), sono ad una distanza reciproca (D_2) che è sostanzialmente non inferiore al doppio della prima distanza (D_1), preferibilmente sostanzialmente pari al doppio della prima distanza (D_1),

le porzioni o diti (F2, F4) del secondo e del quarto elettrodo (E2, E4) si estendono almeno nella direzione longitudinale (L) sostanzialmente alla prima distanza (D_1) l'uno dall'altro, e le porzioni o diti (F2) del secondo elettrodo (E2), rispettivamente le porzioni o diti (F4) del quarto elettrodo (E4), sono ad una distanza reciproca (D_2) che è sostanzialmente non inferiore al doppio della prima distanza (D_1), preferibilmente sostanzialmente pari al doppio della prima distanza (D_1), e preferibilmente

ciascuna porzione o dito (F1) del primo elettrodo (E1) è in posizione sostanzialmente sovrapposta o allineata ad una rispettiva detta porzione o dito (F2) del terzo elettrodo (E2), e ciascuna porzione o dito (F3) del terzo elettrodo (E3) è in posizione sostanzialmente sovrapposta o allineata ad una rispettiva detta porzione o dito (F4) del quarto elettrodo (E4).

2. Il trasduttore piezoelettrico come al punto 1, in cui il primo ed il terzo elettrodo (E1, E3), ovvero le rispettive porzioni o diti (F1, F3), sono elettricamente collegati tra loro (+), ed il secondo e quarto elettrodo (E2, E4), ovvero le rispettive porzioni o diti (F2, F4), sono elettricamente collegati tra loro (-) ed elettricamente isolati rispetto al primo ed al terzo elettrodo (E1, E3), in modo tale per cui uno sforzo di taglio

(SS) applicato allo strato di materiale piezoelettrico (11) almeno nella direzione longitudinale (L) generi tra il primo e terzo elettrodo (E1, E3), da un lato, ed il secondo e quarto elettrodo (E2, E4), dall'altro lato, una differenza di potenziale di entità proporzionale a detto sforzo di taglio (SS).

3. Un trasduttore piezoelettrico in cui:

le porzioni o diti (F1, F3) del primo e del terzo elettrodo (E1, E3) si estendono nella direzione longitudinale (L) sostanzialmente ad una prima distanza (D_1, D_3) l'uno dall'altro, le porzioni o diti (F1) del primo elettrodo (E1) essendo ad una seconda distanza reciproca (D_2) che è maggiore del doppio della prima distanza (D_1, D_3), e le porzioni o diti (F3) del terzo elettrodo (E3) essendo sostanzialmente alla seconda distanza (D_2) tra loro,

le porzioni o diti (F2, F4) del secondo e del quarto elettrodo (F2, F4) si estendono nella direzione longitudinale (L) sostanzialmente alla prima distanza (D_1, D_3) l'uno dall'altro, le porzioni o diti (F2) del secondo elettrodo (E2), rispettivamente le porzioni o diti (F4) del quarto elettrodo (E4), essendo sostanzialmente alla seconda distanza reciproca (D_2).

4. Il trasduttore piezoelettrico come al punto 3, in cui:

- ciascuna detta porzione o dito (F1) del primo elettrodo (E1) è in posizione sostanzialmente sovrapposta o allineata ad una rispettiva detta porzione o dito (F2) del secondo elettrodo (E2), e ciascuna detta porzione o dito (F3) del terzo elettrodo (E3) è in posizione sostanzialmente sovrapposta o allineata ad una rispettiva detta porzione o dito (F4) del quarto elettrodo (E4), oppure

- ciascuna detta porzione o dito (F1) di uno tra il primo ed il terzo elettrodo (E1, E3) è in posizione sostanzialmente sovrapposta o allineata ad una rispettiva detta porzione o dito (F2) di uno tra il secondo ed il quarto elettrodo (E2, E4), e ciascuna detta porzione o dito (F3) dell'altro tra il primo ed il terzo elettrodo (E1, E3) è in posizione sostanzialmente sfalsata rispetto ad una rispettiva detta porzione o dito (F4) dell'altro tra il secondo ed il quarto elettrodo (E2, E4).

5. Il trasduttore piezoelettrico come al punto 4, in cui:

- ciascuna detta porzione o dito (F1) del primo elettrodo (E1) è in posizione sostanzialmente sovrapposta o allineata ad una rispettiva detta porzione o dito (F2) del

secondo elettrodo (E2), e ciascuna detta porzione o dito (F3) del terzo elettrodo (E3) è in posizione sostanzialmente sovrapposta o allineata ad una rispettiva detta porzione o dito (F4) del quarto elettrodo (E4), e il primo ed il terzo elettrodo (E1, E3), ovvero le rispettive dette porzioni o diti (F1, F3), sono elettricamente collegati tra loro (+), ed il secondo e quarto elettrodo (E2, E4), ovvero le rispettive dette porzioni o diti (F2, F4), sono elettricamente collegati tra loro (-) ed elettricamente isolati rispetto al primo ed al terzo elettrodo (E1, E3), in modo tale per cui uno sforzo di taglio (SS) applicato allo strato di materiale piezoelettrico (11) in una direzione trasversale (W) alla direzione longitudinale (L) generi tra il primo e terzo elettrodo (E1, E3), da un lato, ed il secondo e quarto elettrodo (E2, E4), dall'altro lato, una differenza di potenziale di entità proporzionale a detto sforzo di taglio (SS), oppure

- ciascuna detta porzione o dito (F1) di uno tra il primo ed il terzo elettrodo (E1, E3) è in posizione sostanzialmente sovrapposta o allineata ad una rispettiva detta porzione o dito (F2) di uno tra il secondo ed il quarto elettrodo (E2, E4), e ciascuna detta porzione o dito (F3) dell'altro tra il primo ed il terzo elettrodo (E1, E3) è in posizione sostanzialmente sfalsata rispetto ad una rispettiva detta porzione o dito (F4) dell'altro tra il secondo ed il quarto elettrodo (E2, E4), e il primo ed il terzo elettrodo (E1, E3), ovvero le rispettive dette porzioni o diti (F1, F3), sono elettricamente isolati tra loro, ed il terzo e quarto elettrodo (E3, E4), ovvero le rispettive dette porzioni o diti (F3, F4), sono elettricamente isolati tra loro e rispetto al primo ed al terzo elettrodo (E1, E3), in modo tale per cui uno sforzo di taglio (SS) applicato allo strato di materiale piezoelettrico (11) in una direzione trasversale (W) alla direzione longitudinale (L) generi tra uno tra il primo e terzo elettrodo (E1, E3), da un lato, ed uno tra il secondo e quarto elettrodo (E2, E4), dall'altro lato, una differenza di potenziale di entità proporzionale a detto sforzo di taglio (SS), l'uno tra il primo e terzo elettrodo (E1, E3) e l'uno tra il secondo e quarto elettrodo (E2, E4) essendo di preferenza gli elettrodi le cui dette porzioni o diti sono in posizione sostanzialmente sovrapposta o allineata.

6. Un metodo di fabbricazione di un trasduttore piezoelettrico, comprendente i passi di:

i) formare il trasduttore piezoelettrico (10), con il primo elettrodo (E1) e l'almeno un terzo elettrodo (E3, E5), ovvero le rispettive dette porzioni o diti, almeno in

parte in corrispondenza della prima faccia maggiore (11a) dello strato di materiale piezoelettrico (11), e con il secondo elettrodo (E2) e l'almeno un quarto elettrodo (E4, E6), ovvero le rispettive dette porzioni o diti, almeno in parte in corrispondenza della seconda faccia maggiore (11b) del primo strato di materiale piezoelettrico (11),

ii) effettuare una polarizzazione dello strato di materiale piezoelettrico (11), mediante applicazione di una differenza di potenziale tra

almeno uno tra il primo e l'almeno un terzo elettrodo (E1, E3, E5), ovvero le rispettive dette porzioni o diti, da un lato, e

almeno uno tra il secondo e l'almeno un quarto elettrodo (E2, E4, E6), ovvero le rispettive dette porzioni o diti, dall'altro lato,

in cui il passo ii) viene eseguito con una prima configurazione di collegamento elettrico degli elettrodi, ovvero le rispettive dette porzioni o diti, che è differente rispetto ad una seconda configurazione di collegamento elettrico degli elettrodi, ovvero le rispettive dette porzioni o diti, che è utilizzata quando il primo trasduttore piezoelettrico (10) è successivamente impiegato per rilevare uno sforzo di taglio.

RIVENDICAZIONI

1. Un dispositivo di supporto sensorizzato per cuscinetti (1) che comprende:

- un alloggiamento di cuscinetto (2), configurato per essere assicurato ad una struttura di montaggio (S) e definente almeno una sede (2c) per un cuscinetto (3), e

- una base di supporto sensorizzata (4), avente un corpo di supporto (4') predisposto per il posizionamento almeno parziale tra la struttura di montaggio (S) ed l'alloggiamento di cuscinetto (2), direttamente o tramite interposizione di almeno un ulteriore elemento (7; 7'),

in cui il corpo di supporto (4') ha una superficie di rilevazione (4c) che si estende in una direzione longitudinale (L) ed una direzione trasversale (W) e che è configurata per l'appoggio, direttamente o tramite interposizione di almeno un ulteriore elemento (7; 7'), ad una corrispondente superficie (6a; Sa) di uno tra l'alloggiamento di cuscinetto (2) e la struttura di montaggio (S), la base di supporto sensorizzata (4) essendo provvista di mezzi sensori di sforzo meccanico,

in cui i mezzi sensori di sforzo meccanico comprendono almeno un trasduttore piezoelettrico (10; 20; 10_1, 10_2) definente almeno parte della superficie di rilevazione (4c), l'almeno un trasduttore piezoelettrico (10; 20; 10_1, 10_2) essendo configurato per generare una differenza di potenziale elettrico che è sostanzialmente proporzionale all'entità di uno sforzo meccanico (SS) applicato all'alloggiamento di cuscinetto (2).

2. Il dispositivo secondo la rivendicazione 1, in cui l'almeno un trasduttore piezoelettrico (10; 20) comprende un rispettivo strato di materiale piezoelettrico (11; 21) ed almeno un primo elettrodo (E1; E21) ed un secondo elettrodo (E2; E22) tra i quali lo strato di materiale piezoelettrico (11; 21) si estende almeno parzialmente, il primo elettrodo (E1) ed il secondo elettrodo (E2) estendendosi di preferenza in corrispondenza di due facce maggiori opposte (11a, 11b; 21a, 21b) dello strato di materiale piezoelettrico (11; 21), rispettivamente.

3. Il dispositivo la rivendicazione 1 o 2, in cui lo strato di materiale piezoelettrico (11; 21) ha un asse di polarizzazione (PA) che si estende trasversalmente rispetto ad almeno uno tra la direzione longitudinale (L), la direzione trasversale (W) ed un piano identificato dal corpo di supporto (4').

4. Il dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1-3, in cui l'almeno

un trasduttore piezoelettrico (10; 10_1, 10_2) comprende un primo trasduttore piezoelettrico (10_1) configurato per generare una prima differenza di potenziale elettrico rappresentativa di un primo sforzo di taglio (SS), ed un secondo trasduttore piezoelettrico (10_2) configurato per generare una seconda differenza di potenziale rappresentativa di un secondo sforzo di taglio (SS),

dove preferibilmente il primo trasduttore piezoelettrico (10_1) ed il secondo trasduttore piezoelettrico (10_2) sono disposti in modo tale per cui:

- il primo trasduttore piezoelettrico (10_1) è atto a rilevare uno sforzo di taglio in una prima direzione ed il secondo trasduttore piezoelettrico (10_2) è atto a rilevare uno sforzo di taglio in una seconda direzione, la prima direzione e la seconda direzione essendo generalmente trasversali o inclinate tra loro, e/o

- lo strato di materiale piezoelettrico (11) del primo trasduttore piezoelettrico (10_1) ha un asse di polarizzazione (PA) che si estende trasversalmente rispetto alla direzione longitudinale (L), e/o

- lo strato di materiale piezoelettrico (11) del secondo trasduttore piezoelettrico (10_2) ha un asse di polarizzazione (PA) che si estende trasversalmente rispetto alla direzione trasversale (W).

5. Il dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1-3, in cui l'almeno un trasduttore piezoelettrico (10; 20; 10_1, 10_2) comprende almeno uno tra un trasduttore piezoelettrico (10) configurato per generare una differenza di potenziale elettrico sostanzialmente proporzionale ad uno sforzo di taglio (SS) applicato all'alloggiamento di cuscinetto (2) ed un trasduttore piezoelettrico (20) configurato per generare una differenza di potenziale elettrico sostanzialmente proporzionale ad uno sforzo normale applicato all'alloggiamento di cuscinetto (2).

6. Il dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 2-4, in cui il primo elettrodo (E1) ed il secondo elettrodo (E2) dell'almeno un trasduttore piezoelettrico (10; 10_1, 10_2) hanno ciascuno una pluralità di porzioni o diti (F1, F2) che si estendono in corrispondenza di una prima faccia maggiore (11a) ed una seconda faccia maggiore (11a, 11b) dello strato di materiale piezoelettrico (11), rispettivamente.

7. Il dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 2-4, in cui l'almeno un trasduttore piezoelettrico (10; 10_1, 10_2) comprende almeno un terzo elettrodo (E3) ed

un quarto elettrodo (E4), che si estendono in corrispondenza di una prima faccia maggiore (11a) ed una seconda faccia maggiore (11b) dello strato di materiale piezoelettrico (11), rispettivamente.

8. Il dispositivo secondo le rivendicazioni 6 e 7, in cui il terzo elettrodo (E3) ha rispettive porzioni o diti (F3) che sono in configurazione interdigitata o interposta alle porzioni o diti (F1) del primo elettrodo (E1), ed il quarto elettrodo (E4) ha rispettive porzioni o diti (F4) che sono in configurazione interdigitata o interposta alle porzioni o diti (F2) del secondo elettrodo (E2), il primo elettrodo (E1), il secondo elettrodo (E2), il terzo elettrodo (E3) ed il quarto elettrodo (E4) essendo preferibilmente elettrodi sostanzialmente a pettine.

9. Il dispositivo secondo la rivendicazione 7 o la rivendicazione 8, in cui almeno alcuni tra il primo elettrodo (E1), il secondo elettrodo (E2), il terzo elettrodo (E3) ed il quarto elettrodo (E4) sono elettrodi di polarizzazione dello strato di materiale piezoelettrico (11) o sono sia elettrodi di polarizzazione che elettrodi di misura dello strato di materiale piezoelettrico (11).

10. Il dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1-9, in cui l'almeno un trasduttore piezoelettrico (10; 20; 10_1, 10_2) comprende uno strato depositato di materiale piezoelettrico (11; 21) ed elettrodi depositati di materiale elettricamente conduttivo (E1-E4; E22, E23), in corrispondenza di due facce maggiori opposte (11a, 11b; 21a, 21b) dello strato depositato di materiale piezoelettrico (11; 21).

11. Il dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1-10, in cui tra la superficie di rilevazione (4c) e la suddetta corrispondente superficie (6c; Sa) è disposto almeno uno strato o elemento intermedio (7; 7') atto a trasmettere sollecitazioni meccaniche alla base di supporto sensorizzata (4), quale un polimero, o un adesivo, o una resina, o un coperchio inferiore.

12. Il dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1-12, in cui il corpo di supporto (4') ha elementi (B) per il posizionamento relativamente all'alloggiamento di cuscinetto (2), e/o viceversa.

13. Il dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1-12, in cui l'alloggiamento di cuscinetto (2) definisce una sede di posizionamento (6) per ricevere almeno parte della base di supporto sensorizzata (4), la sede di posizionamento (6)

essendo preferibilmente delimitata da un bordo periferico (2d) e/o avendo preferibilmente una superficie di fondo sostanzialmente piana.

14. Un metodo per ottenere un dispositivo di supporto sensorizzato secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1-13, comprendente i passi di:

i) provvedere il corpo di supporto (4') della base di supporto sensorizzata (4), con una superficie di rilevazione (4c) preferibilmente piana;

ii) formare l'almeno un trasduttore piezoelettrico (10; 10_1, 10_2), con almeno un primo elettrodo (E1) almeno in parte in corrispondenza di una prima faccia maggiore (11a) dello strato di materiale piezoelettrico (11), e con almeno un secondo elettrodo (E2) almeno in parte in corrispondenza di una seconda faccia maggiore (11b) dello strato di materiale piezoelettrico (11),

iii) effettuare una polarizzazione dello strato di materiale piezoelettrico (11),

iv) disporre la base di supporto sensorizzata (4) tra una struttura di montaggio (S) e l'alloggiamento di cuscinetto (2),

in cui il passo ii) è preferibilmente realizzato tramite deposizione successiva di differenti strati di materiale (4').

15. Un metodo per la rilevazione di sollecitazioni di un supporto di cuscinetto, comprendente i passi di:

i) provvedere un dispositivo di supporto sensorizzato secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 13,

ii) assicurare l'alloggiamento di cuscinetto (2) ad una struttura di montaggio (S), con interposto almeno in parte il corpo di supporto (4') della base di supporto sensorizzata (4),

iii) generare, tramite l'almeno un trasduttore piezoelettrico (10; 20; 10_1, 10_2), una differenza di potenziale elettrico che è sostanzialmente proporzionale ad almeno uno tra uno sforzo di taglio (SS) e uno sforzo normale applicato all'alloggiamento di cuscinetto (2).

16. Una base di supporto sensorizzata per alloggiamenti di cuscinetto, avente un corpo di supporto (4') che è predisposto per il posizionamento tra una struttura di montaggio (S) ed un alloggiamento di cuscinetto (2), il corpo di supporto (4') avendo una superficie di rilevazione (4c) che si estende in una direzione longitudinale (L) ed

una direzione trasversale (W) e che è configurata per l'appoggio, direttamente o tramite interposizione di almeno un ulteriore elemento (7; 7'), una corrispondente superficie (6a; Sa) di uno tra l'alloggiamento di cuscinetto (2) e la struttura di montaggio (S), la base di supporto sensorizzata (4) essendo provvista di mezzi sensori di sforzo meccanico,

in cui i mezzi sensori di sforzo meccanico comprendono almeno un trasduttore piezoelettrico (10; 20; 10_1, 10_2) definente almeno parte della superficie di rilevazione (4c), l'almeno un trasduttore piezoelettrico (10; 20; 10_1, 10_2) essendo configurato per generare una differenza di potenziale elettrico che è sostanzialmente proporzionale all'entità di uno sforzo meccanico (SS) applicato all'alloggiamento di cuscinetto (2).

Fig. 1

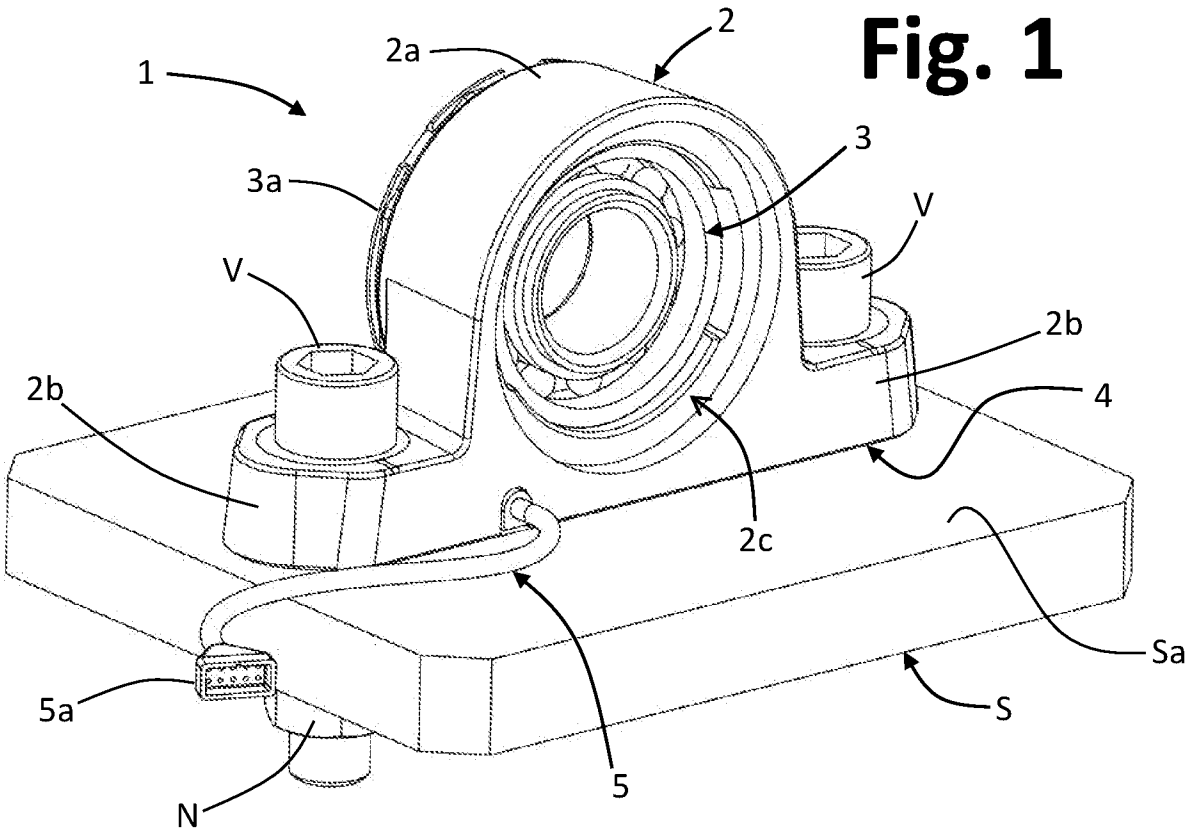
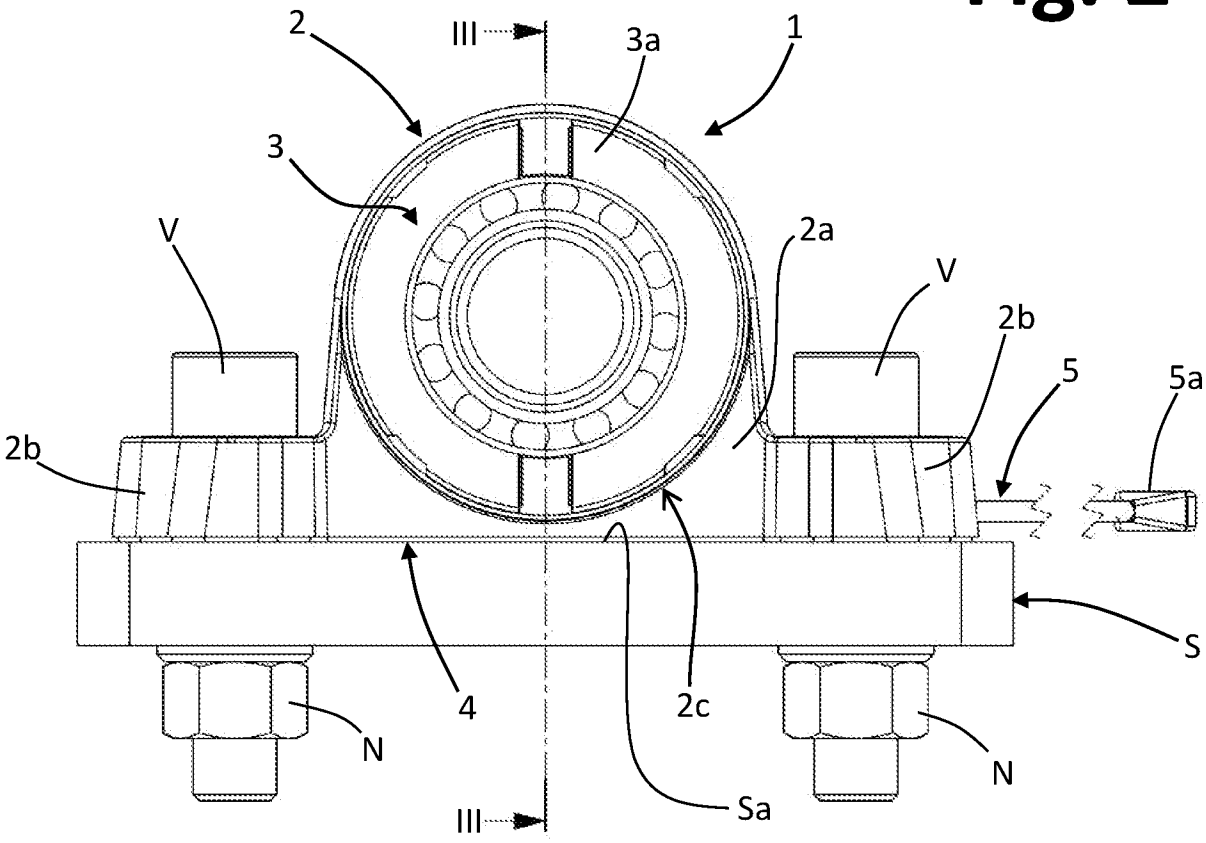

1
2
2a
3
3a
V
V
2b
2b
4
2c
Sa
S
5a
5
N

Fig. 2


2
III
3a
1
3
V
2a
V
2b
5
5a
2b
S
4
2c
N
N
III
Sa

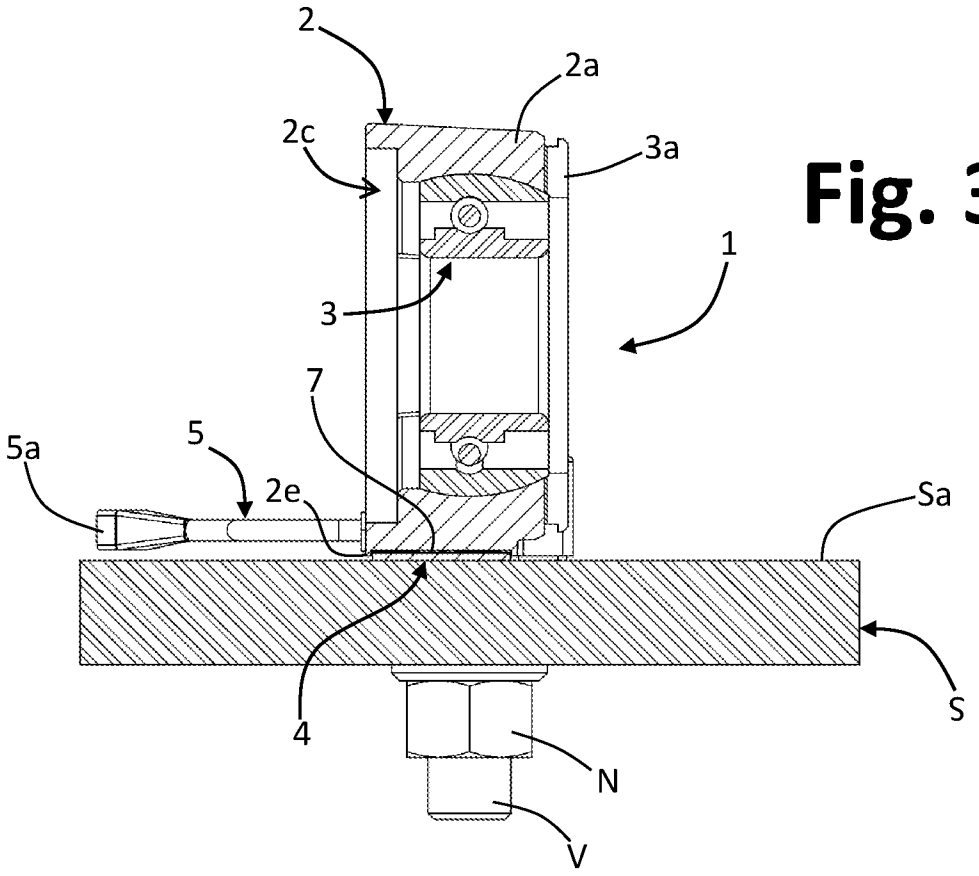


Fig. 3

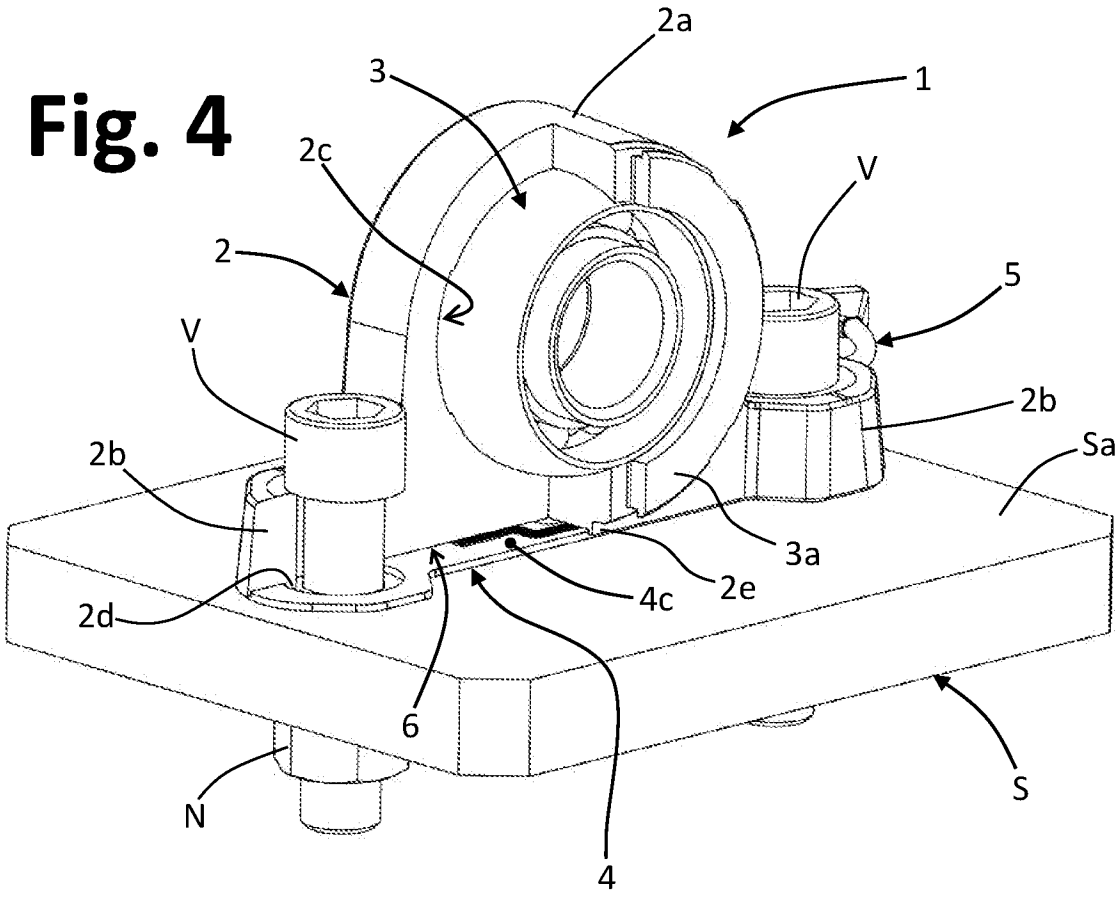


Fig. 4

Fig. 5

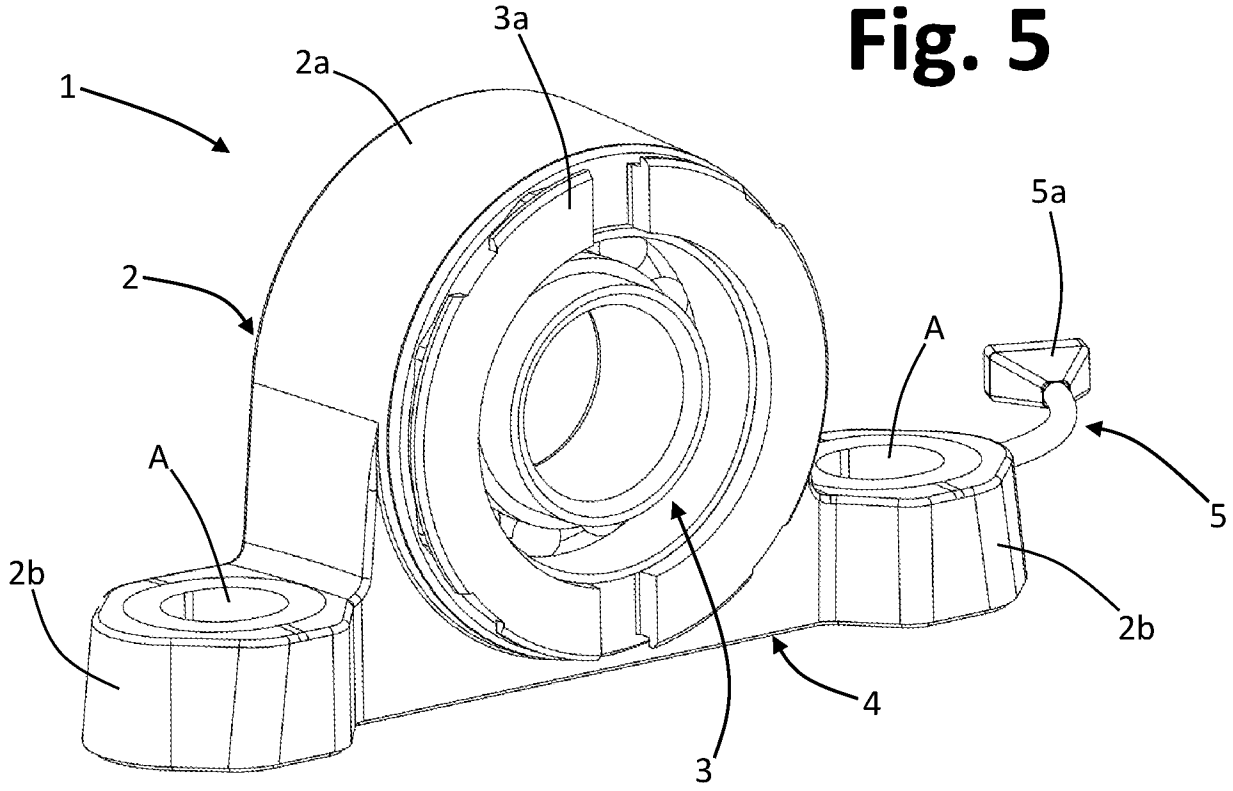
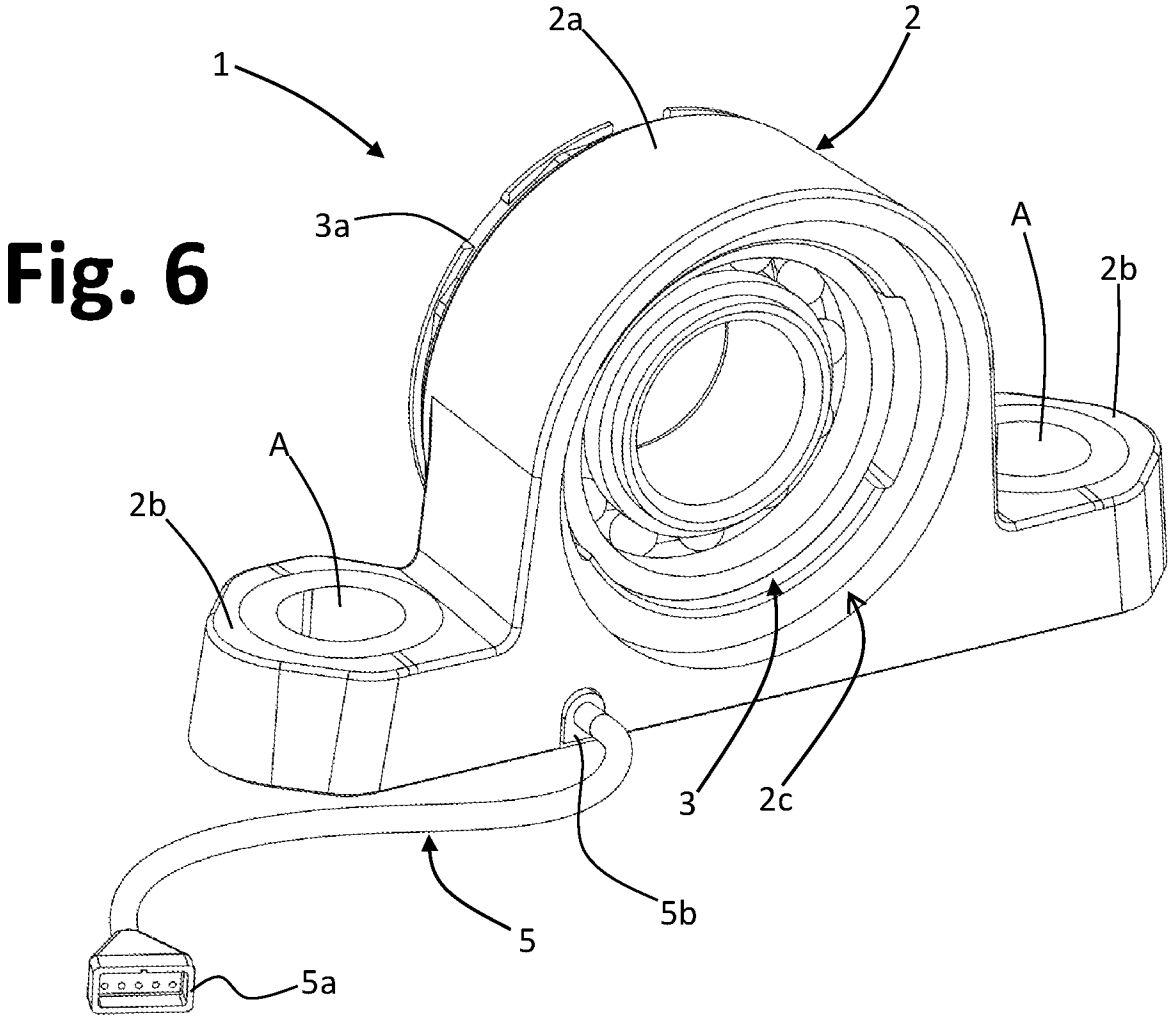


Fig. 6



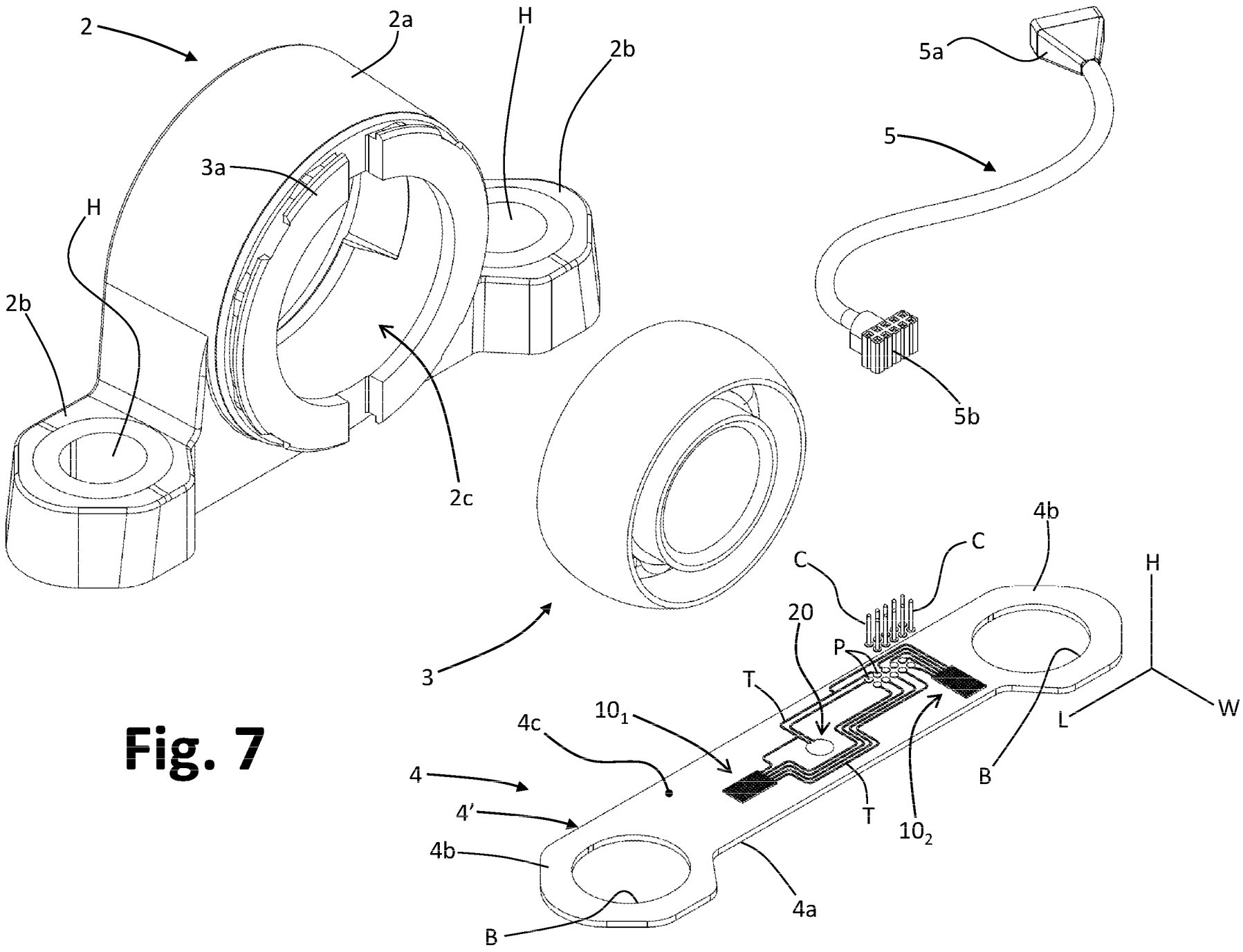


Fig. 7

Fig. 8

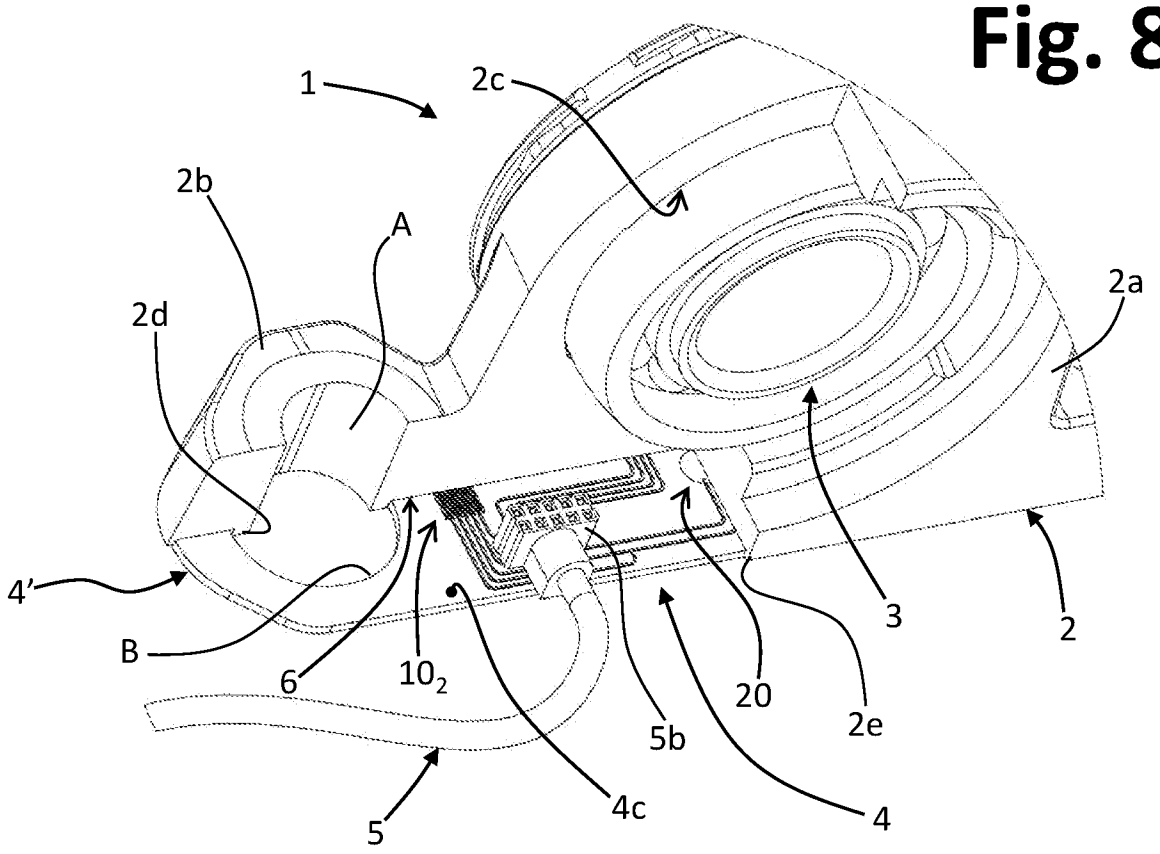

1
2c
2b
A
2d
2a
4'
B
6
10_2
5b
20
2e
3
2
5
4c
4

Fig. 9

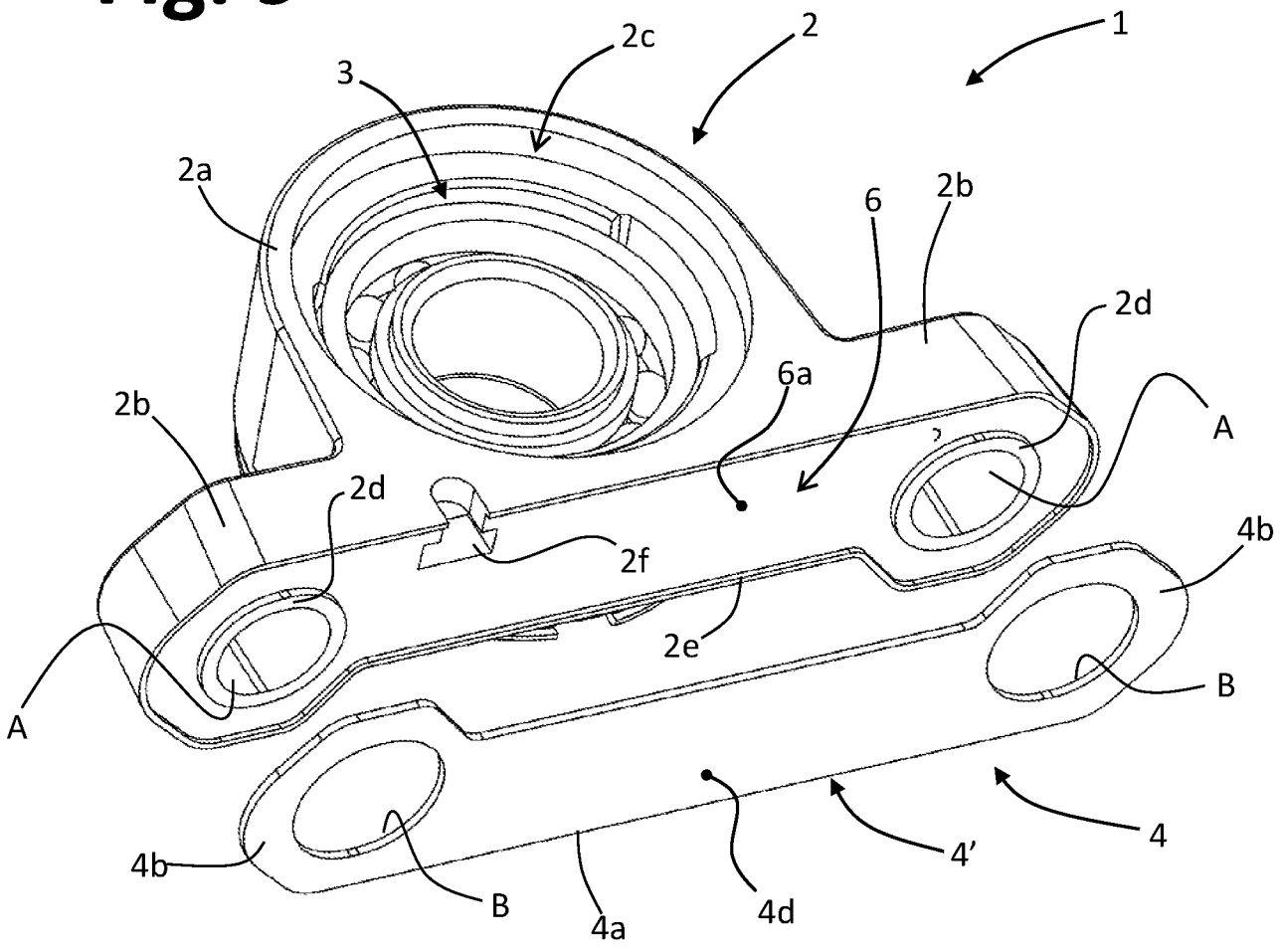
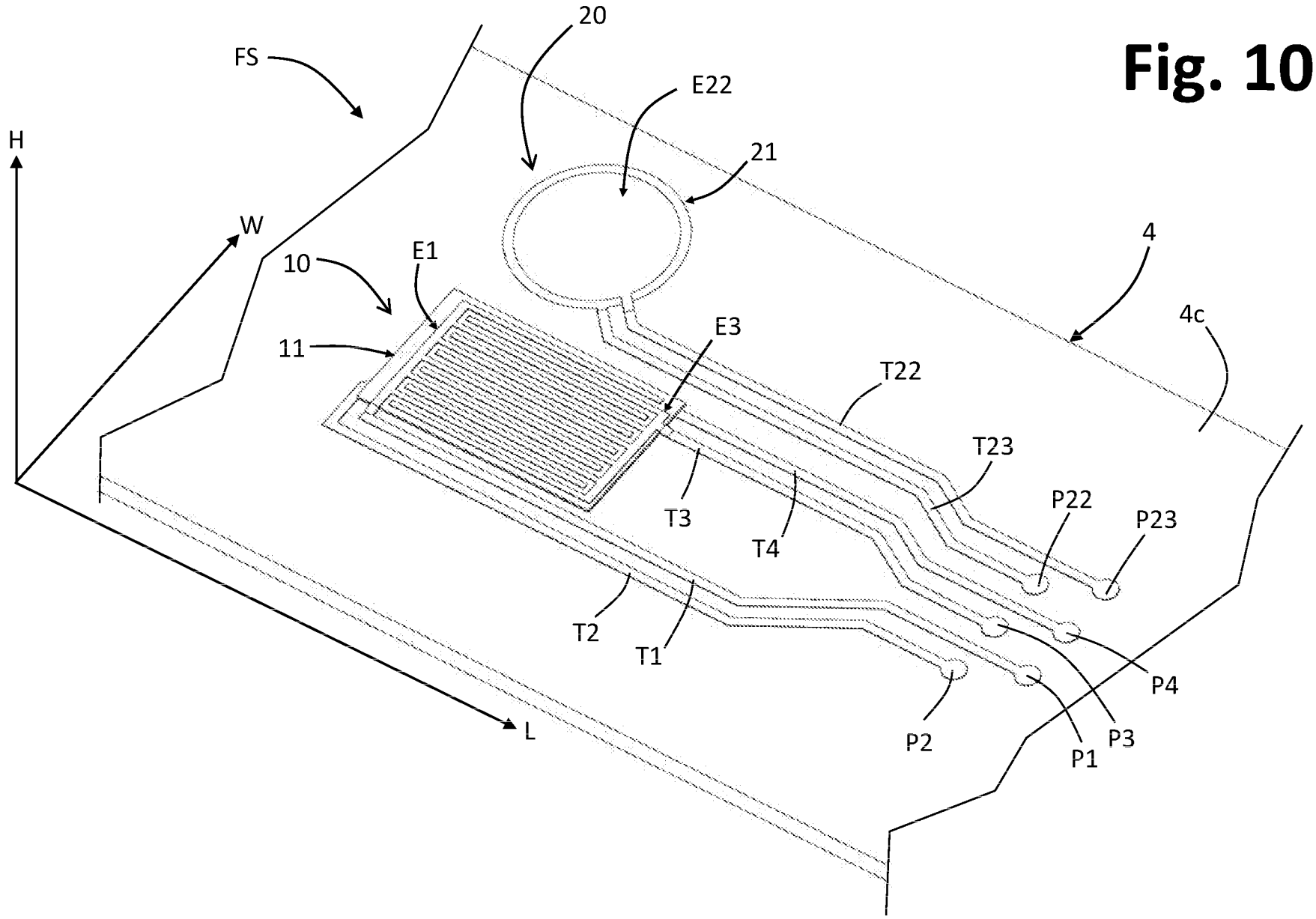

1
2c
2
3
2a
6
2b
2d
6a
2b
A
2d
2f
4b
2e
A
B
4b
B
4a
4d
4'
4

Fig. 10


FS
20
E22
21
H
W
10
E1
4
4c
11
E3
T22
T23
T3
T4
P22
P23
T2
T1
P4
P2
P3
P1
L

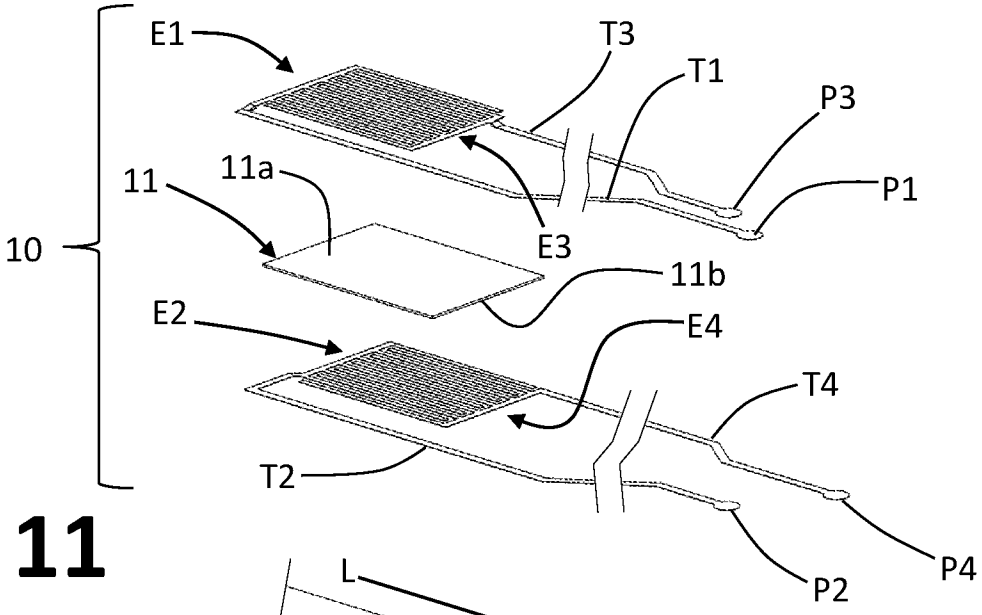
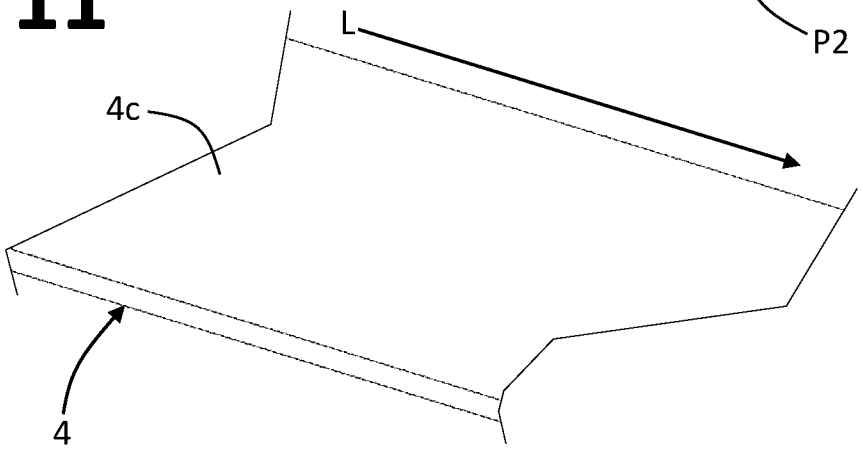

E1
T3
T1
P3
P1
11
11a
10
E3
11b
E2
E4
T4
T2
P2
P4

Fig. 11


L
4c
4

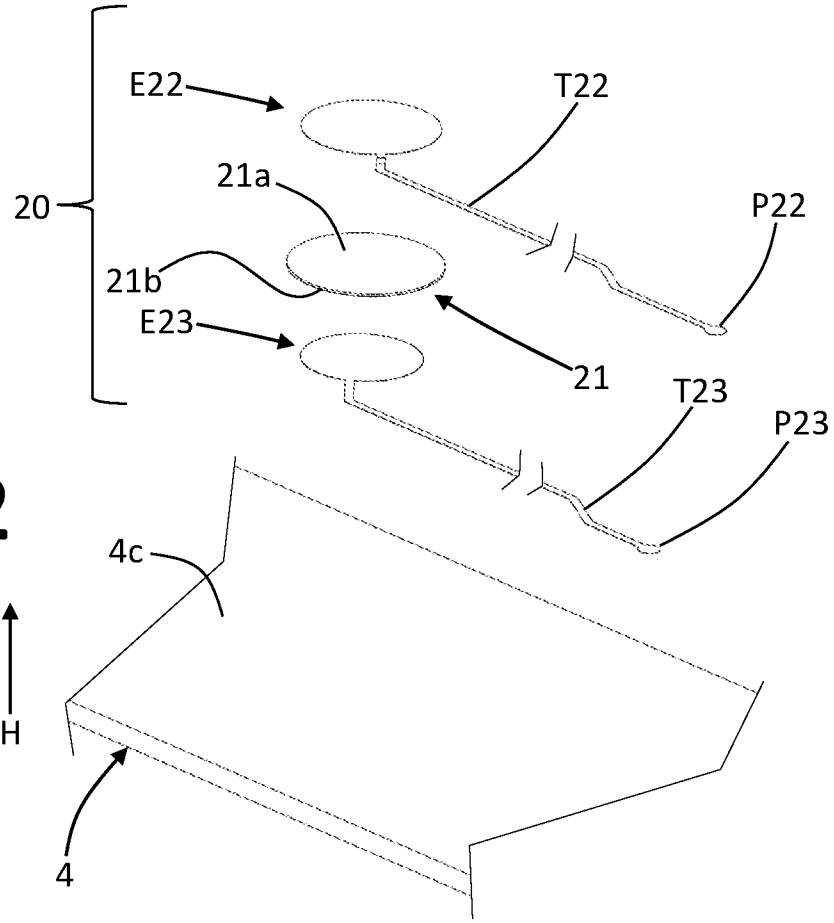

E22
T22
21a
20
P22
21b
E23
21
T23
P23
4c
H
4

Fig. 12

Fig. 13

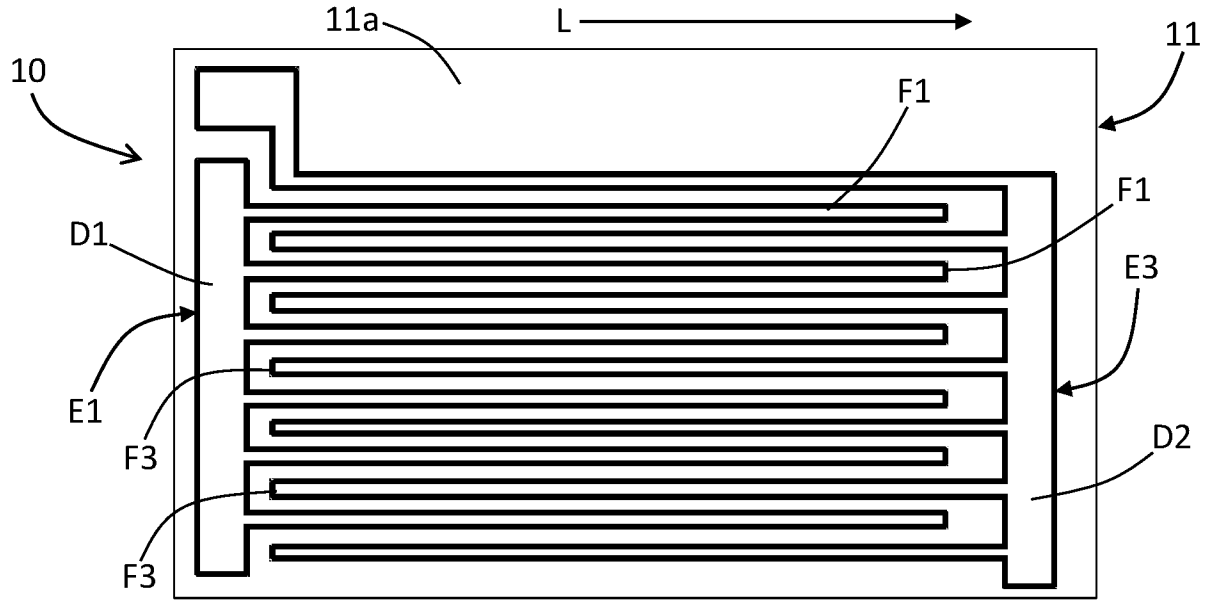


Fig. 14

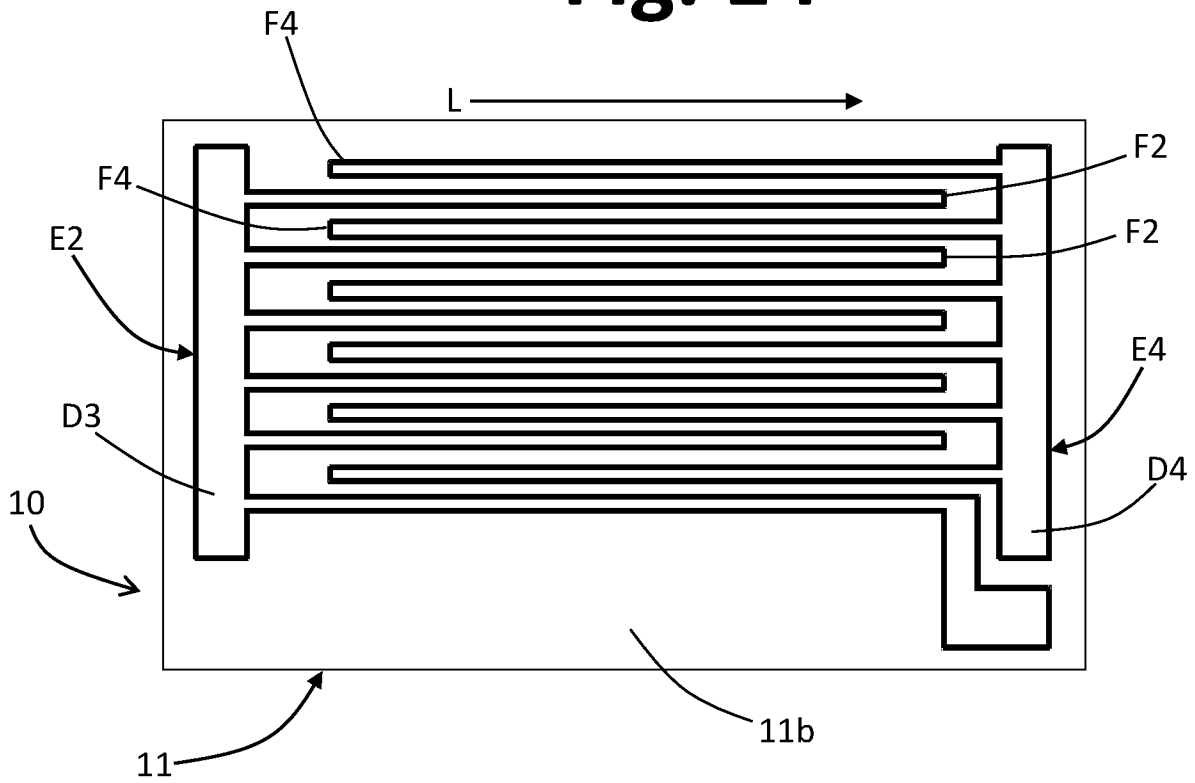


Fig. 15

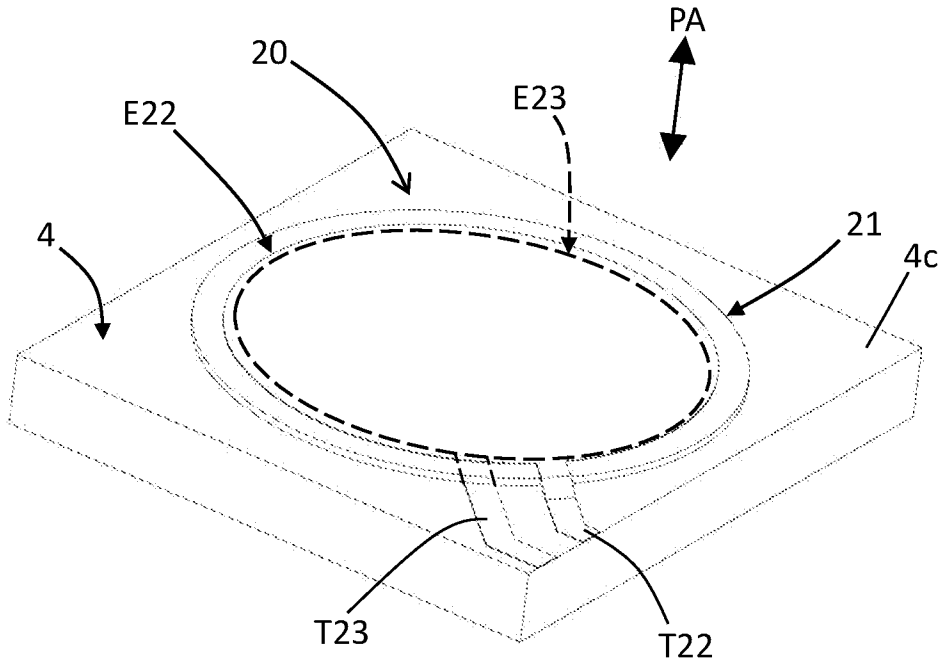

PA
20
E23
E22
21
4
4c
T23
T22

Fig. 16

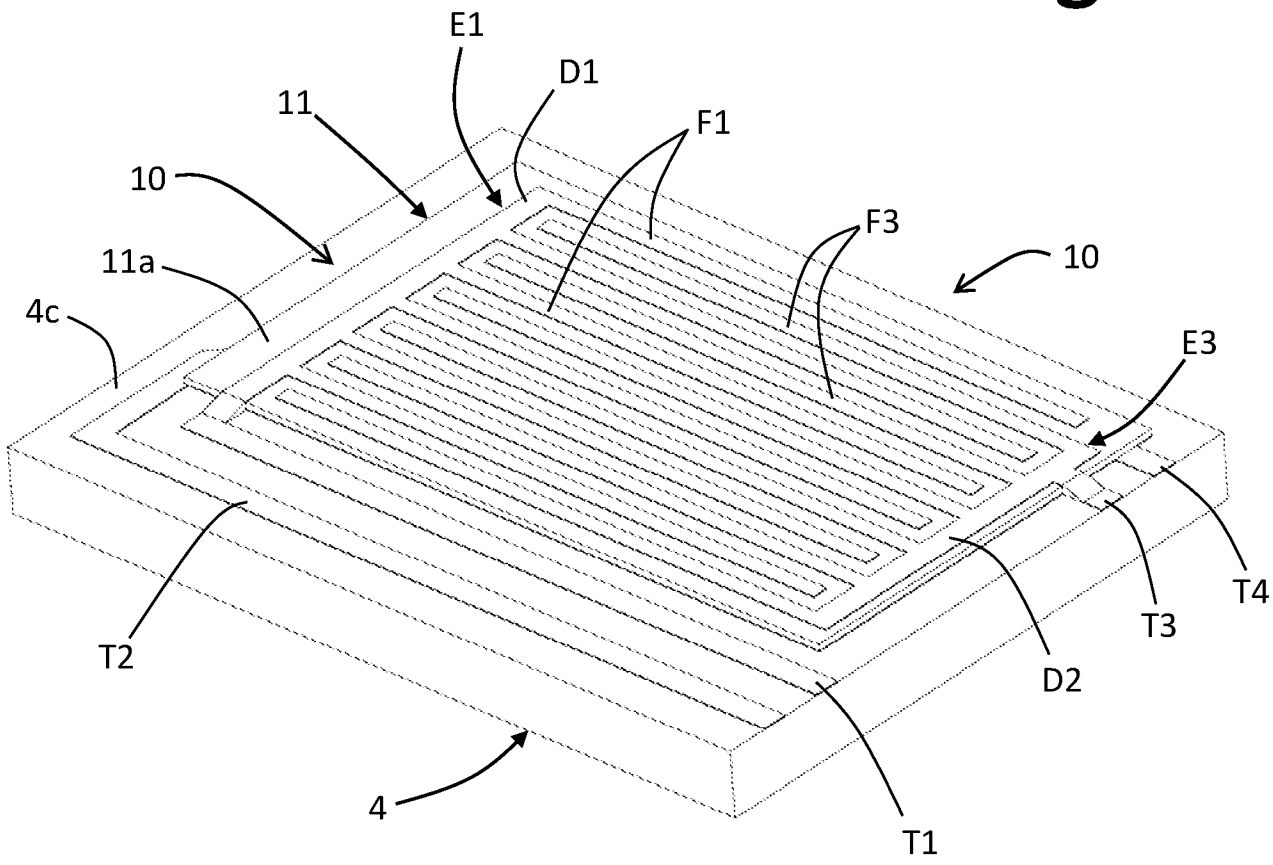

E1
D1
11
F1
10
F3
11a
10
4c
E3
T2
T4
T3
D2
4
T1

Fig. 17

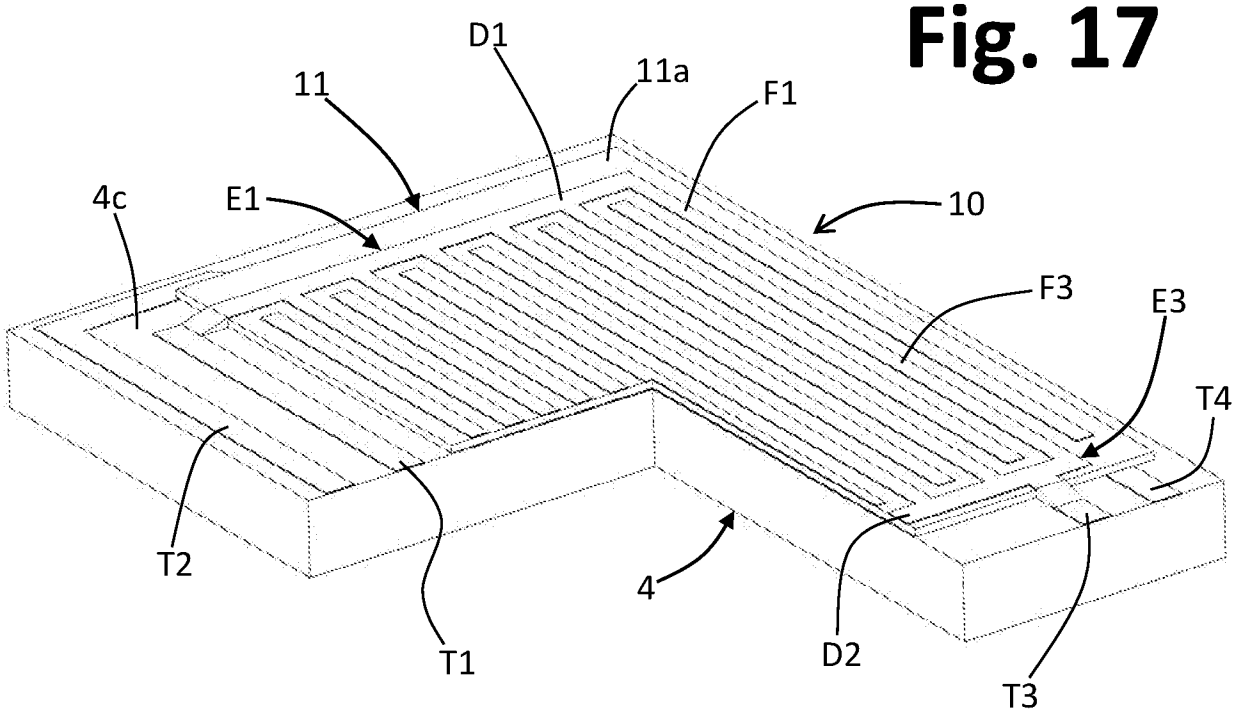

D1
11
11a
F1
4c
E1
10
F3
E3
T4
T2
4
T1
D2
T3

Fig. 18

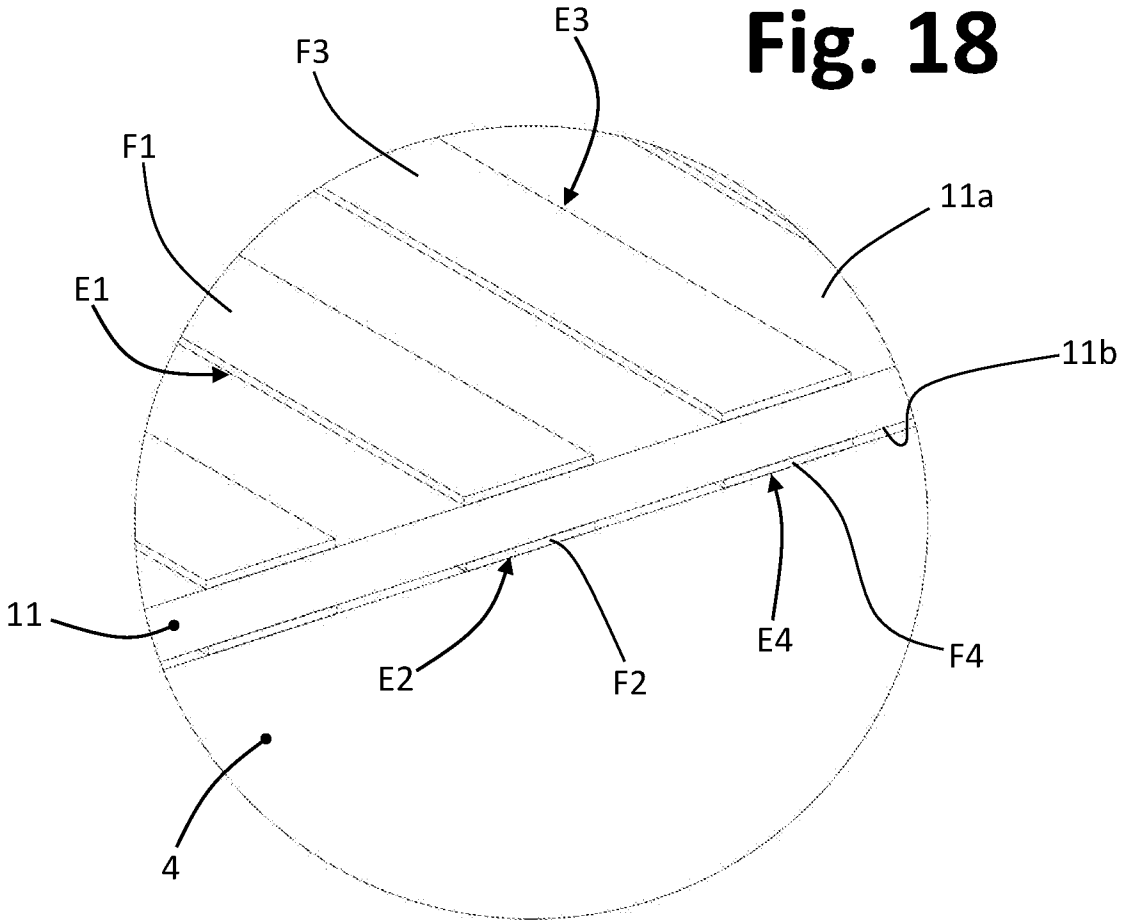

E3
F3
F1
11a
E1
11b
11
E2
F2
E4
F4
4

Fig. 19

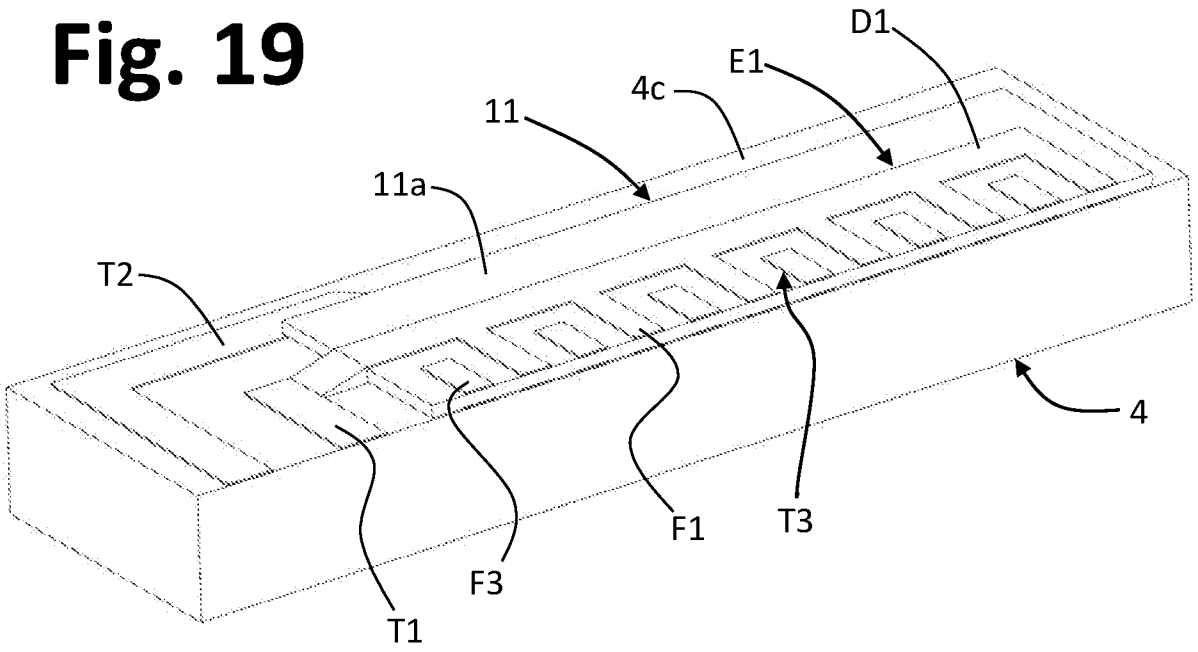

D1
E1
4c
11
11a
T2
4
F1
T3
F3
T1

Fig. 20

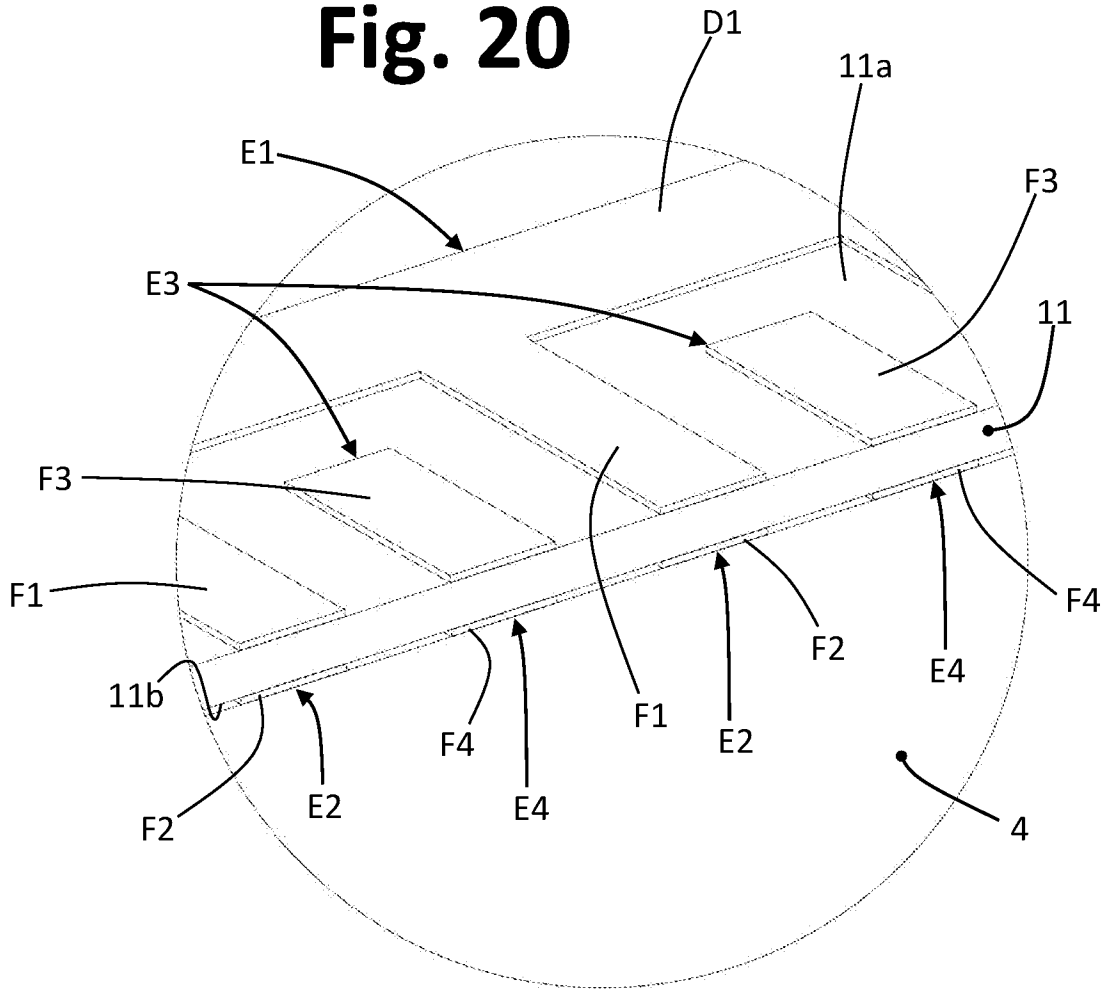

D1
11a
E1
F3
E3
11
F3
F1
F4
F2
E4
11b
F1
F4
E2
E2
E4
F2
4

Fig. 21

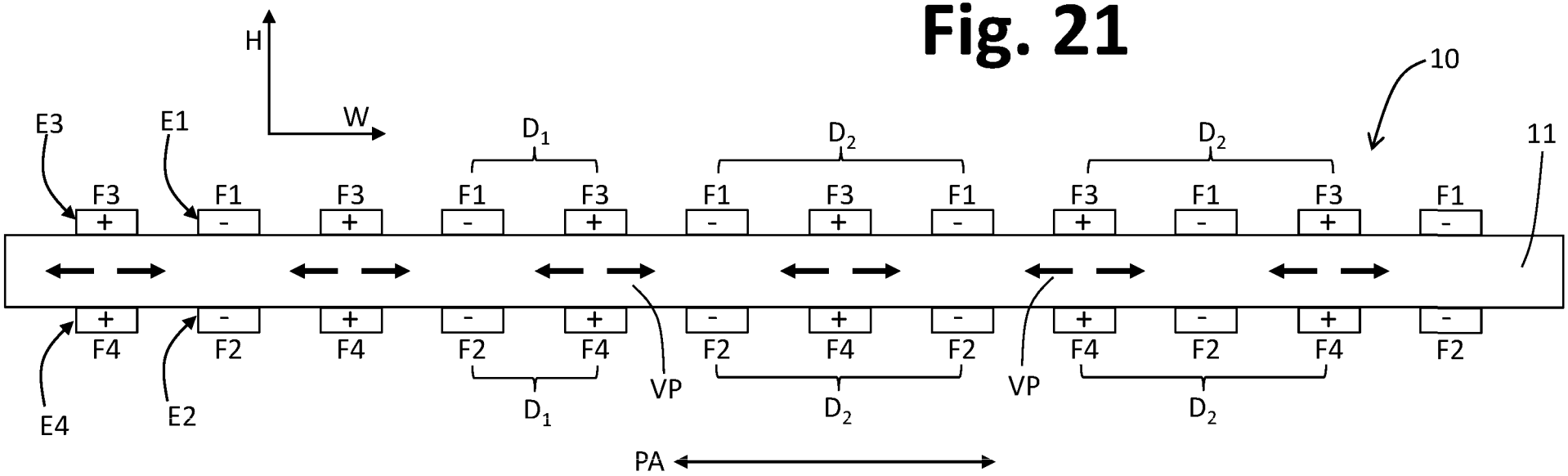

H
W
E3
E1
D1
D2
D2
10
11
F3
F1
F3
F1
F3
F1
F3
F1
F3
F1
F3
F1
+
-
+
-
+
-
+
-
+
-
+
-
F4
F2
F4
F2
F4
F2
F4
F2
F4
F2
F4
F2
E4
E2
VP
VP
PA

Fig. 22

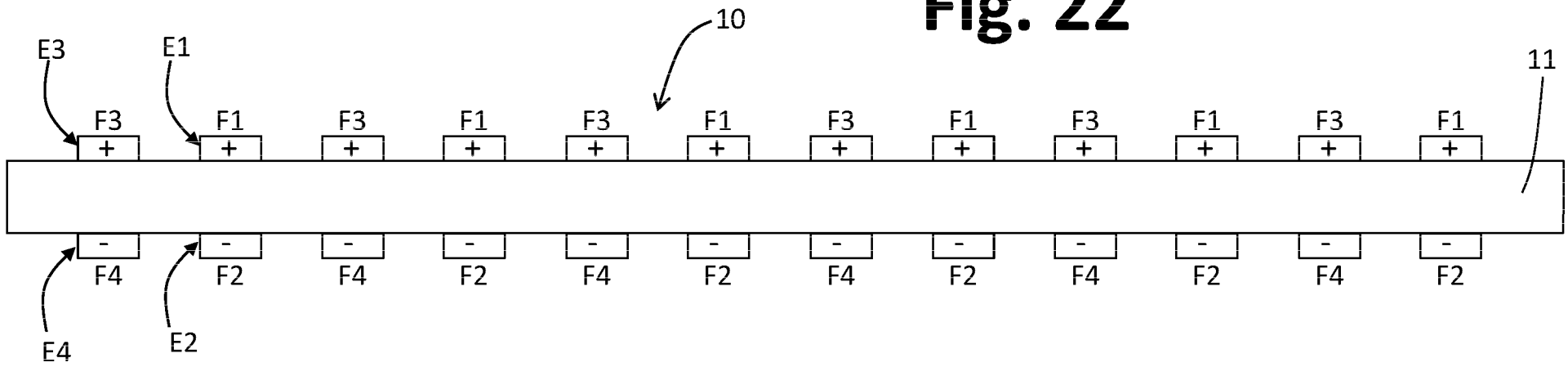

E3
E1
10
11
F3
F1
F3
F1
F3
F1
F3
F1
F3
F1
F3
F1
+
+
+
+
+
+
+
+
+
+
+
+
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
F4
F2
F4
F2
F4
F2
F4
F2
F4
F2
F4
F2
E4
E2

Fig. 23

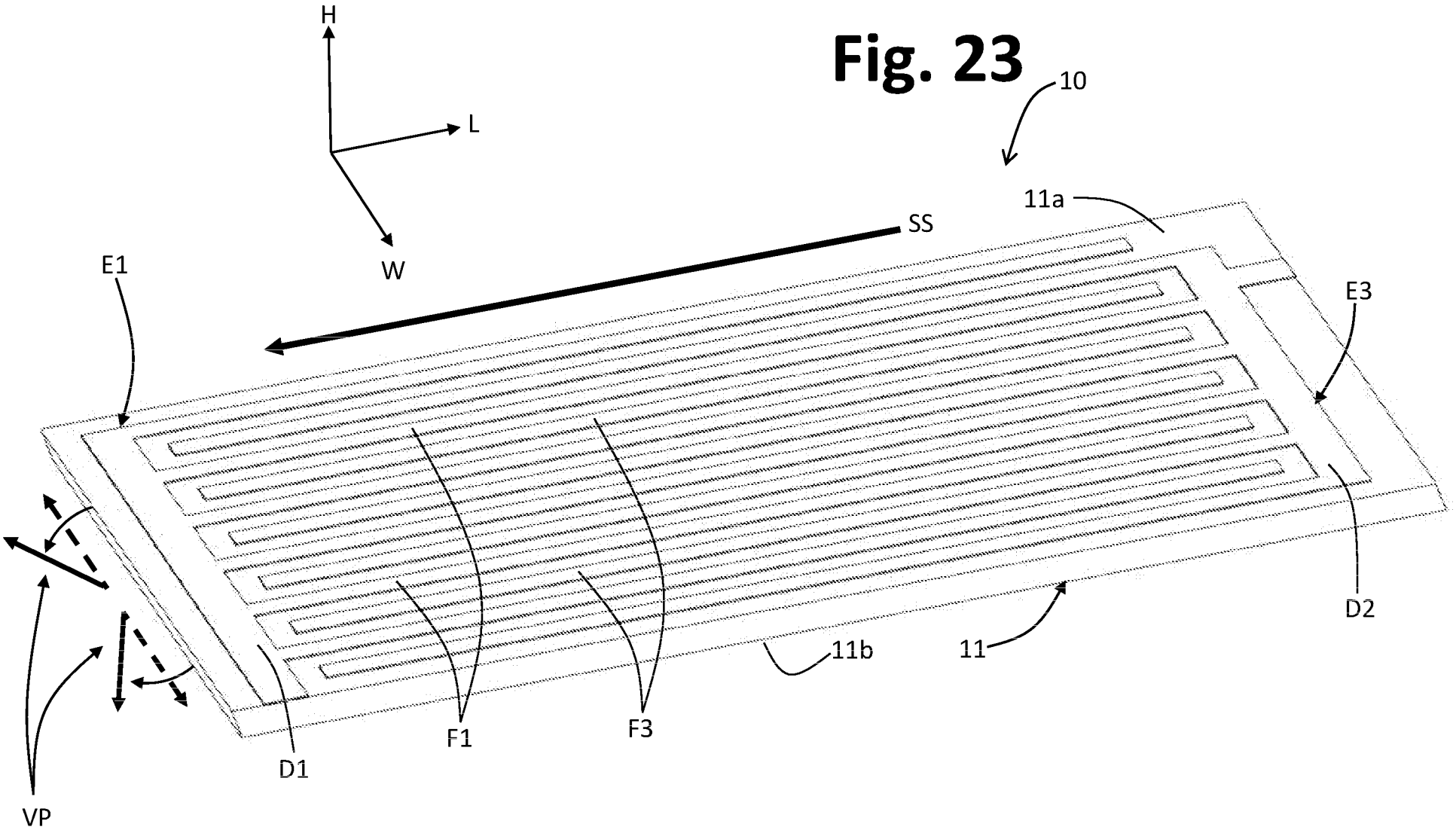


Fig. 24

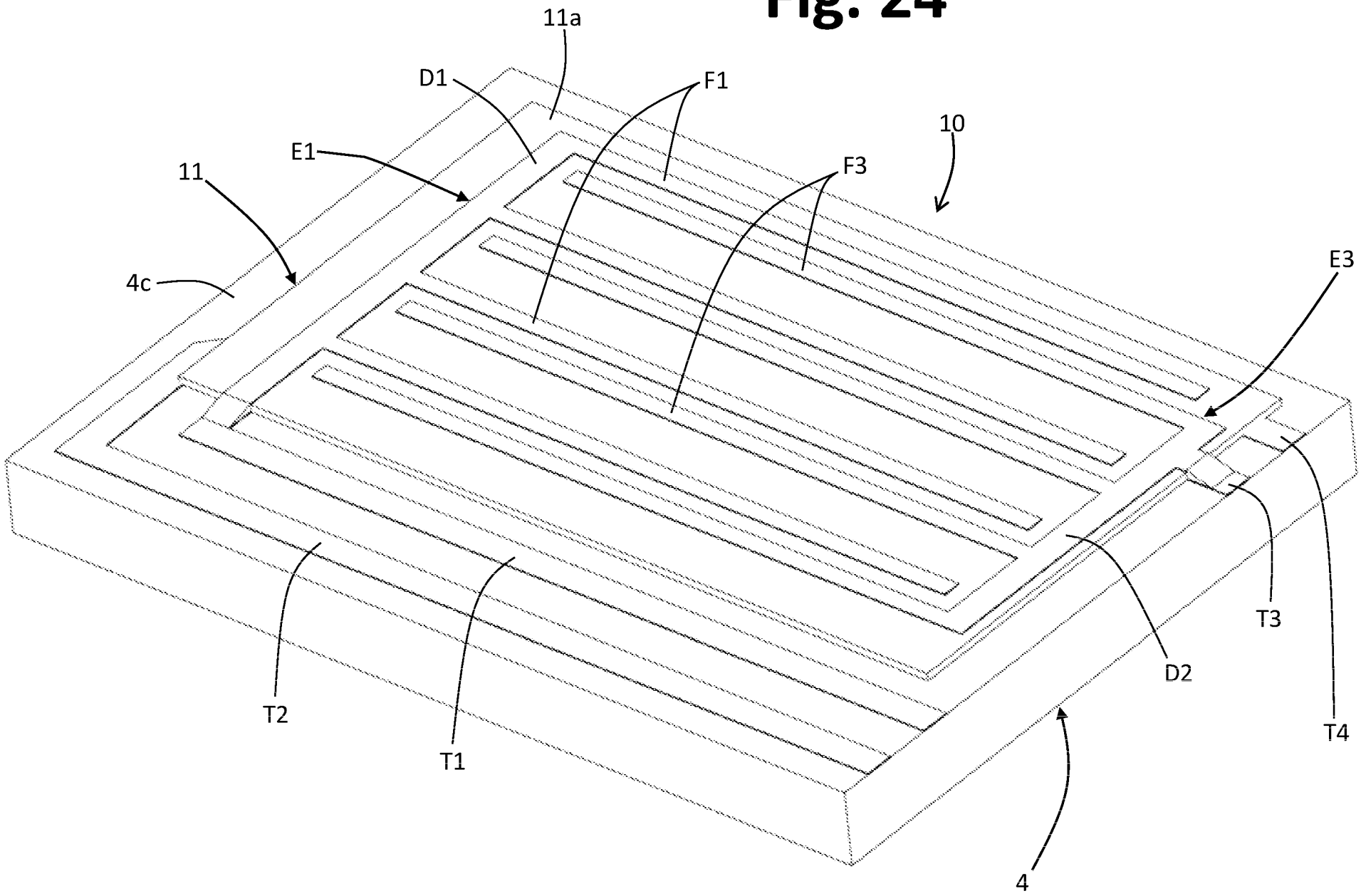


Fig. 25

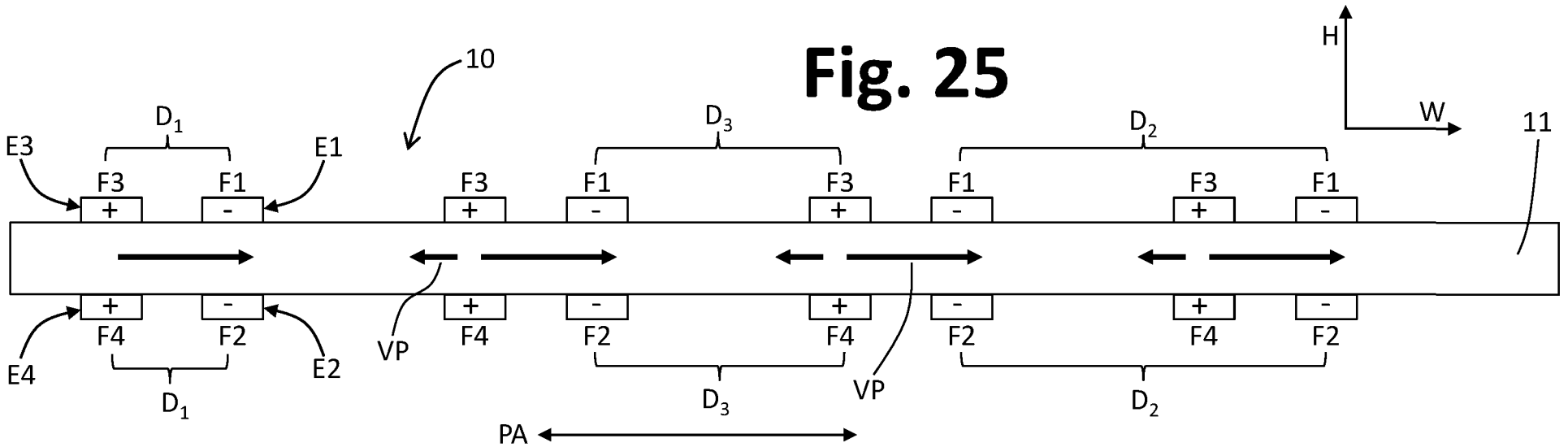


Fig. 26

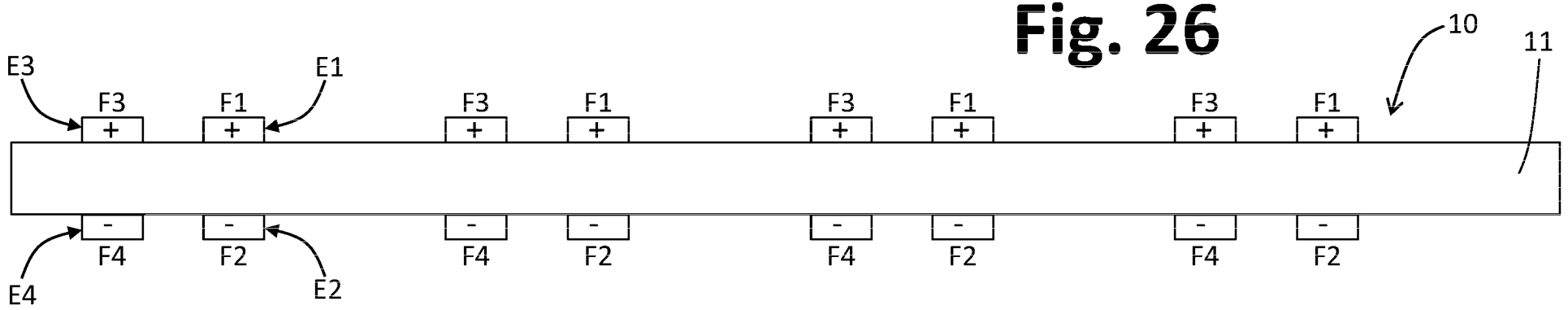


Fig. 27

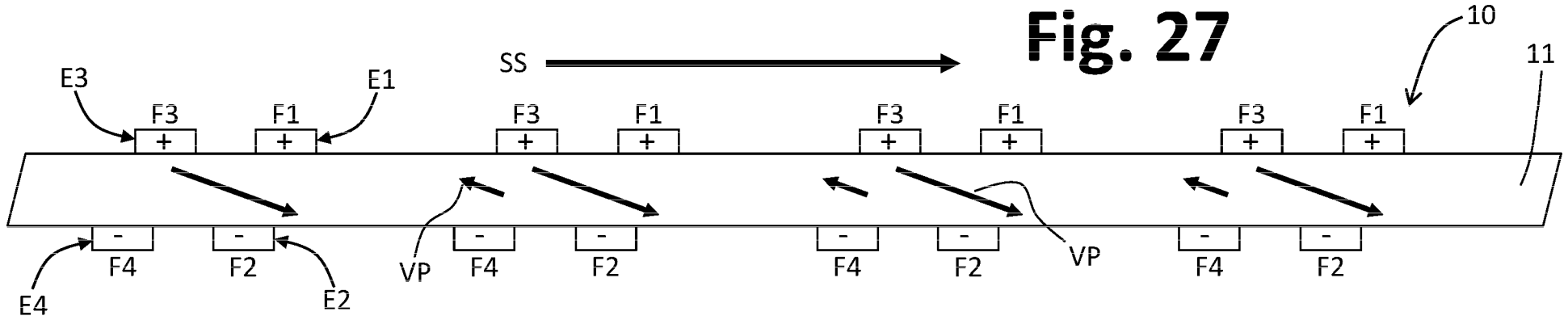


Fig. 28

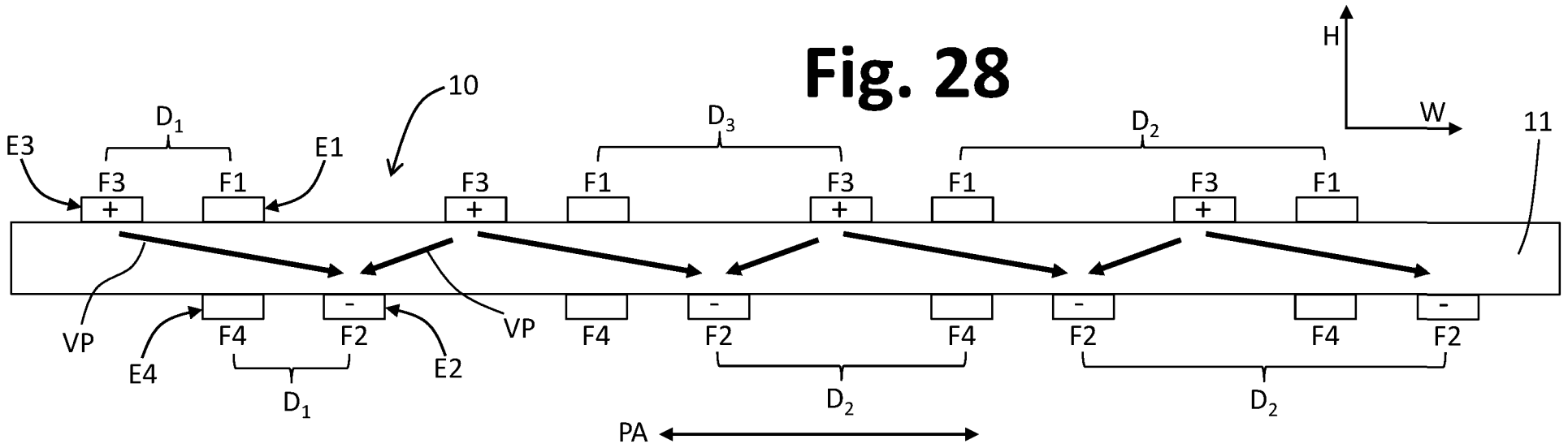


Fig. 29

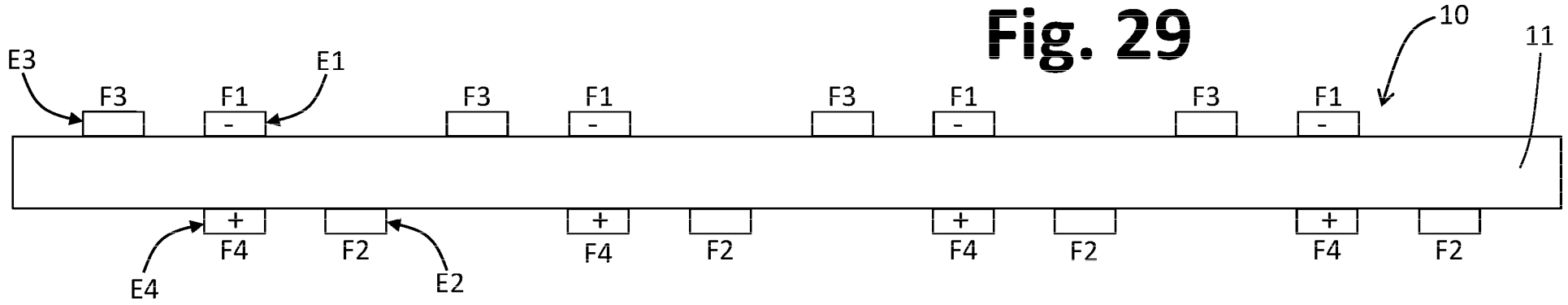


Fig. 30

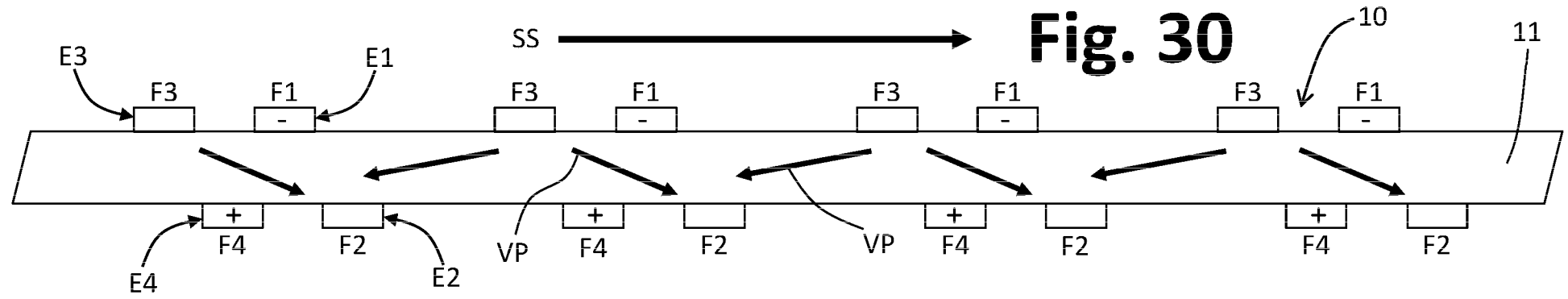


Fig. 31

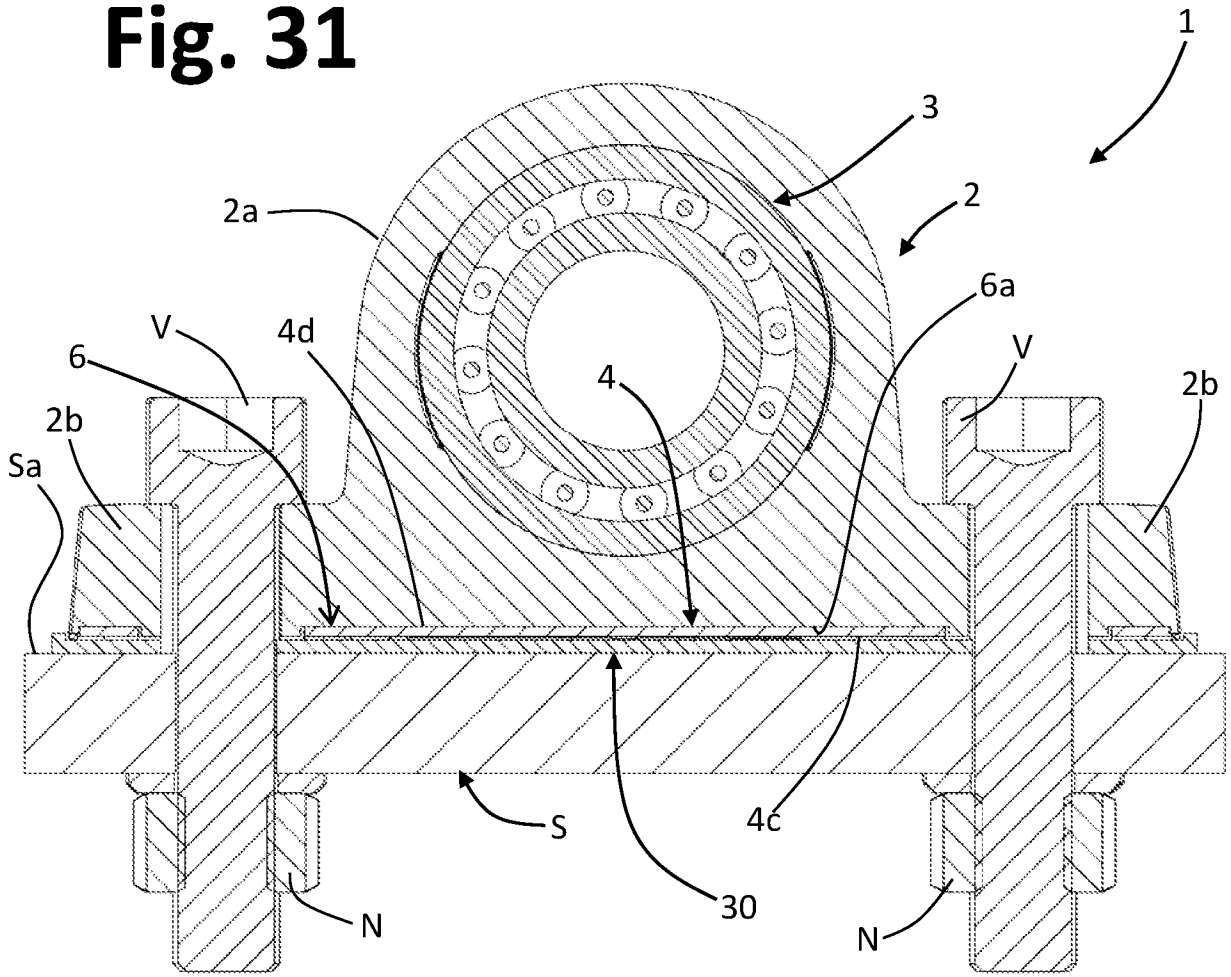
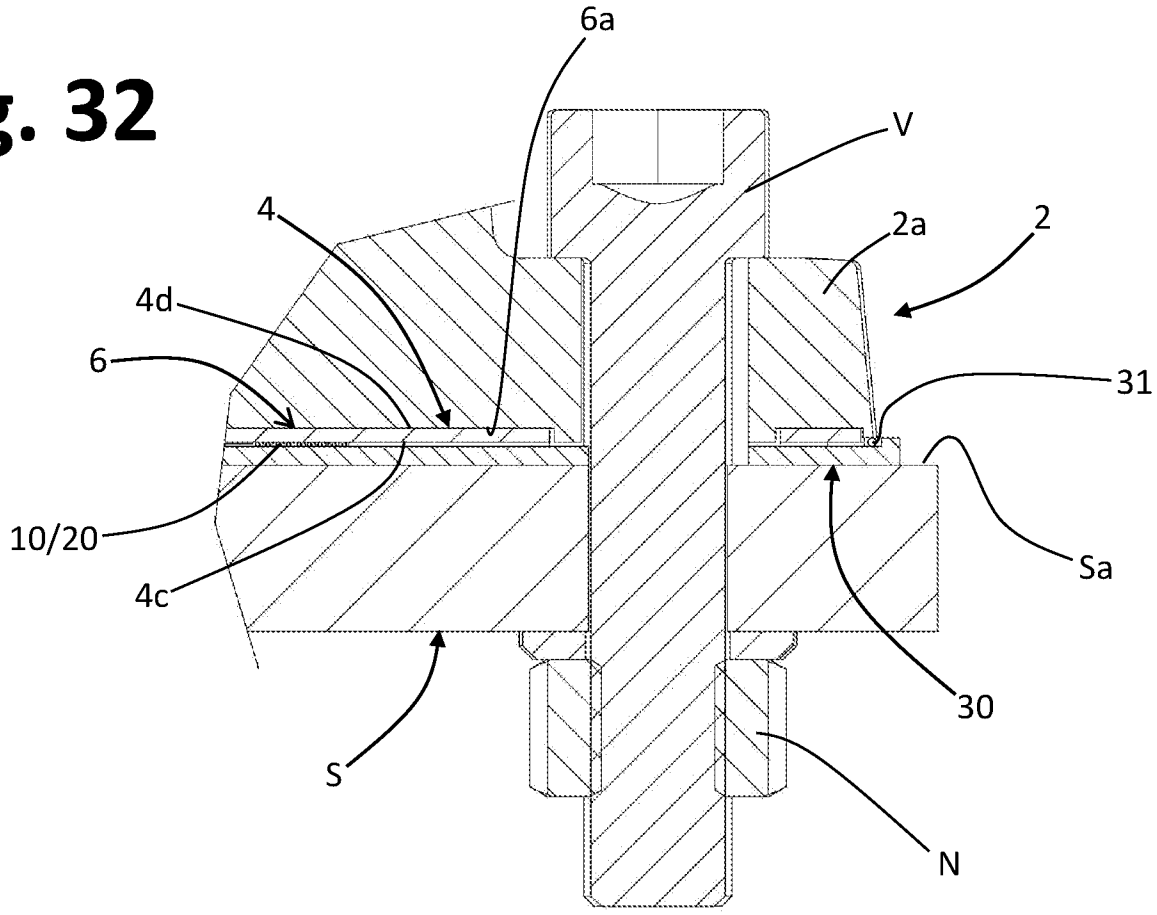

1
3
2
2a
6a
V
4d
6
4
V
2b
2b
Sa
S
4c
30
N
N

Fig. 32


6a
V
4
2a
2
4d
6
31
10/20
Sa
4c
30
S
N