(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 2 296 157 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention de la délivrance du brevet:
10.12.2014 Bulletin 2014/50

(21) Numéro de dépôt: **10175846.4**

(22) Date de dépôt: **08.09.2010**

(51) Int Cl.:
H01H 1/00 *(2006.01)* ***H01H 59/00*** *(2006.01)*

(54) **Actionneur électromécanique à électrodes interdigitées**

Elektromechanischer Stellantrieb mit ineinandergeschobenen Elektroden

Electromechanical actuator with interdigital electrodes

(84) Etats contractants désignés:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO SE SI SK SM TR

(30) Priorité: **11.09.2009 FR 0904345**

(43) Date de publication de la demande:
16.03.2011 Bulletin 2011/11

(73) Titulaire: **Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives**
75015 Paris (FR)

(72) Inventeurs:
- **Diem, Bernard**
  38130 ECHIROLLES (FR)
- **Sibuet, Henri**
  38500 LA BUISSE (FR)

(74) Mandataire: **Guérin, Michel et al**
Marks & Clerk France
Conseils en Propriété Industrielle
Immeuble Visium
22, Avenue Aristide Briand
94117 Arcueil Cedex (FR)

(56) Documents cités:
FR-A1- 2 927 466
US-A1- 2002 145 493
US-A1- 2004 220 650

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

EP 2 296 157 B1

Printed by Jouve, 75001 PARIS (FR)

Description

[0001] L'invention concerne les actionneurs électromécaniques miniatures de type MEMS (de l'anglais Micro-Electro-Mechanical Systems, ou microsystèmes électromécaniques) réalisés selon les technologies de micro-usinage inspirées de la fabrication des puces de circuits intégrés électroniques.

[0002] Les actionneurs sont des éléments qui provoquent une action mécanique sous l'effet de l'application d'une tension ou un courant électrique de commande. L'action mécanique est un déplacement d'un élément mobile de l'actionneur. L'effet de ce déplacement dépend du type d'actionneur considéré ; on s'intéressera principalement dans ce qui suit aux interrupteurs électriques, c'est-à-dire que le déplacement de l'élément mobile entraîne l'ouverture ou la fermeture d'un contact électrique ; mais on peut éventuellement appliquer l'invention aussi à d'autres types d'actionneurs, tels que des interrupteurs optiques dans lesquels le déplacement de l'élément mobile vient interrompre ou modifier le chemin optique suivi par un faisceau lumineux.

[0003] On a déjà proposé des interrupteurs électriques de type MEMS qui sont actionnés par une force électromagnétique produite par une petite bobine électrique intégrée dans une partie fixe de l'interrupteur, la bobine agissant sur une partie magnétique portée par l'élément mobile de l'actionneur. On a également proposé d'autres actionneurs dont l'élément mobile est déplacé par une force électrostatique produite entre deux armatures conductrices planes situées en regard l'une de l'autre, l'une formée sur un substrat de l'actionneur, l'autre portée par l'élément mobile de l'actionneur. Le brevet US 7 071 431 décrit des interrupteurs qui fonctionnent sur ce principe. L'élément mobile est une poutre encastrée en porte à faux, parallèle au substrat fixe. La force électrostatique est exercée entre le substrat et la poutre et tend à attirer l'extrémité libre de celle-ci vers le substrat. Un plot de contact électrique est porté par l'extrémité de la poutre et vient en contact avec un ou plusieurs plots correspondants du substrat lorsqu'une tension de commande suffisante est appliquée entre le substrat et la poutre.
Le document "US 2002/145 493 A1" décrit un actionneur électromagnétique selon le préambule de la revendication 1.

[0004] Parmi les facteurs importants à prendre en considération dans la conception d'un interrupteur électrique, il y a, entre autres :

- la force d'actionnement, nécessaire pour faire passer l'interrupteur d'un premier état dans un autre ; cette force doit être suffisante pour que l'élément mobile puisse passer d'une première position dans une deuxième position (et réciproquement) malgré les forces de maintien (par exemple magnétiques) ou de rappel (par exemple l'élasticité d'une poutre) qui peuvent s'exercer sur l'élément mobile lorsqu'il est dans la première position ;
- la tension appliquée pour obtenir cette force : on souhaite qu'elle soit aussi faible que possible, notamment pour être compatible avec les tensions d'alimentation usuelles des circuits intégrés (quelques volts) ;
- la consommation de courant, inévitable pour obtenir ce passage d'un état vers un autre état ; on souhaite une faible consommation ;
- la consommation de courant nécessaire pour maintenir l'interrupteur dans son état ; l'idéal de ce point de vue est un maintien sans aucune consommation de courant ;
- la force appliquée entre les contacts électriques lorsque l'interrupteur est fermé : si elle est trop faible, le contact n'est pas bon et l'interrupteur ne peut laisser passer qu'un courant très faible (ou alors c'est au détriment de sa durée de vie) ;
- la distance entre les contacts électriques lorsque l'interrupteur est dans un état ouvert ; il faut qu'elle soit suffisante pour qu'il n'y ait pas de risque d'une conduction parasite de courant entre les contacts dans l'état ouvert de l'interrupteur, mais pas trop grande pour ne pas engendrer des déplacements trop importants de l'élément mobile de l'interrupteur.

[0005] Tous ces paramètres sont interdépendants ; par exemple il y a un lien entre la force d'actionnement et la tension de commande appliquée ; ou un lien entre la distance entre les contacts dans l'état ouvert et la force d'actionnement nécessaire pour refermer l'interrupteur.

[0006] Un but de l'invention est de proposer une solution permettant de trouver plus facilement un bon compromis entre les facteurs qu'on vient de décrire.

[0007] Selon l'invention, on prévoit un actionneur électromécanique miniature à commande électrostatique qui comprend un substrat fixe et un élément mobile articulé sur le substrat de manière à permettre un déplacement d'une partie de l'élément mobile dans une première direction choisie, une série de plaques conductrices parallèles sur l'élément mobile, dont la hauteur s'étend dans la première direction et qui sont espacées régulièrement dans une deuxième direction perpendiculaire à la première, et une autre série de plaques conductrices parallèles sur le substrat fixe, les deux séries de plaques étant interdigitées symétriquement l'une dans l'autre et en recouvrement mutuel sur une partie de leur hauteur de manière qu'une tension électrique appliquée entre les deux séries produise une force électrostatique ayant une composante selon la hauteur des plaques dans la première direction, les plaques ayant des extrémités opposées dans une troisième direction perpendiculaire aux deux premières, **caractérisé en ce que** les extrémités opposées des plaques de l'une des séries sont solidaires mécaniquement et électriquement de deux traverses d'extrémité qui viennent en regard des extrémités opposées des plaques de l'autre série.

[0008] Les traverses sont de préférence solidaires des plaques de l'élément mobile. La première série de pla-

ques conductrices mobiles forme une électrode mobile interdigitée avec la deuxième série de plaques qui forme une électrode fixe. Une tension de commande est appliquée entre ces deux électrodes.

[0009] En d'autres mots, si on observe les plaques des deux séries coupées selon une section dans un plan perpendiculaire à la direction de déplacement choisie, chaque plaque de l'électrode fixe est entièrement entourée par un matériau conducteur qui comprend deux plaques de l'électrode mobile ainsi que les parties de traverses qui les réunissent à leurs deux extrémités opposées. On pourrait éventuellement prévoir l'inverse, à savoir que chaque plaque mobile peut être entourée par deux plaques fixes solidaires de deux traverses.

[0010] Les traverses sont de préférence micro-usinées dans le même matériau conducteur que les plaques de la première série et forment un bloc homogène avec elles.

[0011] Les plaques conductrices sont de préférence planes ; leur longueur dans la troisième direction est de préférence plus grande que leur hauteur dans la direction de déplacement. Cette direction de déplacement (et donc la hauteur des plaques) est de préférence perpendiculaire à la surface du substrat dans lequel sont usinées les électrodes fixe et mobile. Les plaques fixes s'élèvent donc verticalement à partir de la surface du substrat.

[0012] L'articulation de l'électrode mobile sur le substrat est de préférence usinée dans le même matériau que les plaques fixes ou les plaques mobiles. Elle peut être constituée par des bras de torsion autorisant une rotation des plaques dans leur propre plan, donc autour d'un axe parallèle au substrat et perpendiculaire aux plaques, ou par des bras ou des plaques de flexion encastrées dans le substrat et autorisant également une rotation de l'électrode mobile dans le plan des plaques.

[0013] Les deux traverses d'extrémité qui relient entre elles les plaques d'une série sont de préférence situées exactement à égale distance des deux extrémités opposées d'une plaque de l'autre série, et cette distance est de préférence la même pour toutes les plaques. L'application d'une tension de commande entre les électrodes fixes et mobiles crée des forces dans le sens du déplacement souhaité, mais aussi des forces longitudinales qui s'exercent entre une traverse reliant les plaques de la première série et les extrémités de plaques de l'autre série. Ces dernières forces se compensent cependant lorsque les deux traverses sont situées à la même distance des extrémités opposées d'une même plaque.

[0014] Avec cette structure d'électrodes interdigitées terminées par des traverses on crée des forces élevées dans la direction de déplacement choisie, en annulant partiellement ou de préférence totalement les forces qui pourraient être générées dans une direction perpendiculaire à la direction de déplacement choisie, forces qui engendreraient des déformations des électrodes, voire un collage d'électrodes adjacentes.

[0015] De plus, les traverses rigidifient l'ensemble de plaques parallèles qu'elles relient et rendent plus difficile leur déformation.

[0016] Dans un mode de réalisation, l'élément mobile de l'actionneur est agencé de manière symétrique de part et d'autre de l'articulation, à la manière d'une bascule, et il comporte deux électrodes mobiles solidaires l'une de l'autre (constituées chacune par une série de plaques conductrices). Ces électrodes mobiles fonctionnent en opposition de phase, c'est-à-dire qu'une tension de commande appliquée à une électrode mobile tend à la rapprocher du substrat, ce qui éloigne l'autre, et réciproquement. Chaque électrode mobile est associée à une électrode fixe respective avec laquelle elle est interdigitée.

[0017] Pour constituer un interrupteur électrique, l'élément mobile peut porter un ou plusieurs plots de contact électrique permettant d'établir une liaison électrique lorsque l'élément mobile est déplacé dans une position correspondant à une fermeture d'interrupteur. Par exemple, le plot porté par l'élément mobile vient court-circuiter deux conducteurs portés par le substrat fixe lorsque l'extrémité libre de l'élément mobile se rapproche du substrat sous l'effet de la force électrostatique.

[0018] L'interrupteur ainsi formé, peut, notamment dans le cas où il est constitué avec des moyens d'actionnement symétriques, être associé à des moyens de maintien magnétique qui permettent de conserver l'état atteint par l'interrupteur même après suppression de la tension ou du courant de commande de basculement. Les moyens de maintien magnétique comprennent par exemple un aimant permanent placé au-dessus de l'élément mobile et une couche douce en matériau magnétique placée au-dessous de l'élément fixe. Ou alors ils comprennent un ou plusieurs aimants permanents intégrés dans le substrat fixe au-dessous de l'élément fixe et de l'élément mobile.

[0019] De préférence, une couche conductrice est formée sur le substrat au-dessous des plaques constituant les électrodes mobiles, entre les plaques constituant les électrodes fixes et au même potentiel que celles-ci, pour créer une force d'attraction électrostatique supplémentaire attirant l'élément mobile vers le substrat.

[0020] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée qui suit et qui est faite en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 représente une vue de dessus d'un actionneur selon l'invention, micro-usiné à partir d'un substrat plan ;
- la figure 2 représente une coupe verticale, selon la ligne 1-1 de la figure 1, de l'actionneur de la figure 1, dans un premier état ;
- la figure 3 représente une coupe de l'actionneur dans un deuxième état ;
- la figure 4 et la figure 5 représentent schématiquement les diverses forces qui s'exercent entre les éléments fixes et les éléments mobiles de l'actionneur ;
- la figure 6 représente une réalisation d'une interrup-

teur à contacts symétriques et à commande symétrique ;
- la figure 7 représente un interrupteur à maintien magnétique par aimant placé au-dessus de la structure micro-usinée ;
- la figure 8 représente un interrupteur à maintien magnétique par aimants intégrés au substrat de la structure micro-usinée ;
- la figure 9 décrit des étapes d'un procédé de fabrication de l'actionneur.

[0021] L'actionneur des figures 1 et 2 est un interrupteur électrique qui est formé sur un substrat plan 10. La figure 2 représente l'interrupteur dans l'état ouvert. Le substrat 10 peut être en matériau électriquement isolant ou en silicium, dans lequel sont formées des couches conductrices, et/ou semiconductrices et/ou isolantes gravées selon des motifs désirés à l'aide des techniques classiques de la microélectronique (successions de dépôts de couches, gravures de ces couches, dopages, etc.).

[0022] Le substrat peut porter des plots de contact 12 et 14 pour permettre l'application d'une tension de commande d'ouverture ou fermeture de l'interrupteur. Ces plots peuvent servir de plots de soudure pour la soudure de fils de connexion reliant l'interrupteur à des éléments de circuit extérieurs servant à commander l'interrupteur. Le substrat 10 peut également porter deux plots 16 et 18 qui constituent la sortie de l'interrupteur : lorsque l'interrupteur est ouvert, ces plots sont isolés électriquement l'un de l'autre ; lorsque l'interrupteur est fermé, ils sont reliés électriquement l'un à l'autre ; ces plots 16 et 18 peuvent également servir de plots de soudure de fils de connexion reliant l'interrupteur à des éléments de circuit extérieurs que l'interrupteur est destiné à commander.

[0023] La partie mécanique de l'interrupteur comprend deux éléments, l'un fixe par rapport au substrat, l'autre mobile par rapport au substrat. Ces deux éléments sont conducteurs et servent respectivement d'électrode fixe et d'électrode mobile, la force d'actionnement de l'interrupteur étant une force électrostatique rapprochant l'électrode mobile de l'électrode fixe lorsqu'une tension de commande est appliquée entre ces électrodes. L'électrode fixe est reliée électriquement au plot 12 et l'électrode mobile est reliée électriquement au plot 14.

[0024] L'électrode mobile est reliée au substrat par une articulation ART autour de laquelle elle pivote. Pour simplifier, on peut considérer que l'articulation est une articulation à rotation simple située à une première extrémité de l'électrode mobile. L'axe de rotation peut être considéré comme parallèle au plan du substrat (plan de la vue de dessus de la figure 1) et perpendiculaire au plan de la coupe de la figure 2. Le sens de rotation est indiqué par une flèche R et la rotation provoque un basculement de l'électrode mobile de sorte que son extrémité libre, située à l'opposé de l'articulation, se déplace dans une direction perpendiculaire au plan du substrat (direction représentée par une flèche Z).

[0025] L'électrode fixe est constituée par une série de plaques conductrices parallèles PF s'élevant à partir de la surface supérieure du substrat selon une hauteur qui est orientée selon la direction Z ; l'électrode mobile est constituée par une série de plaques conductrices parallèles PM intercalées symétriquement au milieu des intervalles entre les plaques PF de l'électrode fixe. On a donc deux électrodes constituées par une série de plaques conductrices parallèles interdigitées. Les électrodes sont espacées selon une direction Y parallèle au plan du substrat.

[0026] Les plaques parallèles sont allongées dans une direction générale d'allongement X qui est perpendiculaire aux directions Y et Z. Les plaques sont de préférence planes.

[0027] Les plaques PF et les plaques PM sont en recouvrement mutuel sur une partie de leur hauteur, c'est-à-dire que le bas des plaques mobiles PM ne descend pas jusqu'en bas des plaques fixes PF, et le haut des plaques fixes PF ne monte pas jusqu'en haut des plaques mobiles PM.

[0028] Les plaques fixes PF sont toutes électriquement reliées entre elles et sont reliées électriquement au plot 12 ; elles sont en pratiques usinées dans une même couche conductrice ; les plaques mobiles PM sont toutes reliées électriquement entre elles et sont reliées électriquement au plot 14 ; elles sont usinées dans une autre couche conductrice.

[0029] Le détail des motifs de couches conductrices et isolantes permettant de faire les liaisons entre les plaques et les plots 12 et 14 n'est pas représenté. Ces couches sont formées dans une partie superficielle 20 du substrat. La liaison électrique entre les plaques mobiles se fait à travers l'articulation ART. La liaison avec les plaques fixes peut se faire par contact direct entre le bas des plaques et une couche conductrice déposée sur le substrat.

[0030] L'électrode mobile comprend non seulement les plaques mobiles conductrices PM mais aussi des traverses 22 et 24 situées aux extrémités opposées des plaques (opposées par rapport à la direction générale d'allongement X). La traverse 22 est située à proximité de l'articulation ART et est solidaire mécaniquement et électriquement de toutes les extrémités proximales des plaques mobiles (extrémités proches de l'articulation) ; la traverse 24 est solidaire mécaniquement et électriquement de toutes les extrémités distales (éloignées de l'articulation) des plaques mobiles. Les traverses s'étendent sur toute la hauteur des plaques mobiles et sont formées dans la même couche qu'elles.

[0031] Par conséquent, si on observe la vue de dessus de la figure 1, on voit que chacune des plaques fixes PF, sauf les deux plaques fixes en bout de série, est entièrement entourée par un rectangle de matériau conducteur qui comprend deux plaques mobiles PM et deux portions de traverses qui relient ces deux plaques mobiles à chacune de leurs extrémités opposées. La figure 1 correspond à un cas où il y a N+1 plaques fixes pour N

plaques mobiles. On peut envisager l'inverse, c'est-à-dire N+1 plaques mobiles pour N plaques fixes, et dans ce cas toutes les plaques fixes sont entourées par deux plaques mobiles et les portions de traverse qui les relient.

[0032] De préférence, la distance qui sépare une extrémité d'une plaque fixe de la traverse 22 est rigoureusement égale à la distance qui sépare l'autre extrémité de cette plaque fixe de la traverse 24 ; cette distance est de préférence constante sur toute la hauteur de la plaque fixe et identique d'une plaque fixe à l'autre. Cette distance (dans la direction X) est de préférence deux à trois fois plus grande que l'espacement uniforme (dans la direction Y) entre n'importe quelle plaque conductrice fixe et les plaques conductrices mobiles adjacentes.

[0033] L'articulation à rotation ART, qui permet au groupe de plaques conductrices PM formant l'électrode mobile de tourner dans leur propre plan autour d'un axe parallèle au substrat, comprend par exemple un pied d'ancrage rigide 40 solidaire du substrat, et des barres de torsion 42, 44 horizontales, s'étendant dans la direction Y perpendiculaire au plan des plaque parallèles ; ces barres de torsion 42, 44 relient le pied d'ancrage 40 et la traverse 22. Dans l'exemple représenté, la traverse 22 comporte une zone évidée 46 dans laquelle sont situés le pied d'ancrage et les barres de torsion 42 et 44. Les barres de torsion pourraient aussi être situées à l'extérieur de l'électrode mobile, de part et d'autre de celle-ci, plutôt que dans un évidement de la traverse 22. L'articulation pourrait être réalisée différemment, par exemple par une plaque mince agissant en flexion, s'étendant perpendiculairement à la direction d'allongement des plaques mobiles, sur toute la hauteur de celles-ci, cette plaque étant ancrée à son pied au substrat le long d'une ligne d'encastrement selon la direction Y. La minceur de cette plaque de flexion autoriserait une flexion autour de cette ligne d'encastrement, ce qui équivaut à une rotation de l'ensemble des plaques mobiles dans leur plan autour de cette ligne. Là aussi, la plaque de flexion peut être située dans un évidement de la traverse 22 ou être située à l'extérieur de l'électrode et décomposée en deux plaques situées de part et d'autre de l'électrode mobile.

[0034] Les traverses 22 et 24 sont de préférence usinées dans le même bloc de matériau conducteur qui forme les plaques mobiles. Dans une réalisation, ce matériau est un matériau à la fois conducteur et magnétique, tel que du nickel-fer 80/20.

[0035] L'application d'une tension de commande entre les plaques conductrices fixes et les plaques mobiles exerce une force électrostatique ayant une composante dans la direction Z, et cette force rapproche l'extrémité distale de l'électrode mobile du substrat en s'opposant à la force de rappel créée par les bras de torsion ou la plaque de flexion de l'articulation à rotation.

[0036] L'extrémité distale libre de l'électrode mobile porte un ou plusieurs plots de contact servant à établir un contact électrique entre les plots 16 et 18 du substrat lorsque la tension de commande appliquée a déplacé l'électrode mobile vers le substrat 10.

[0037] Par exemple, les plots 16 et 18 sont reliés chacun à un conducteur respectif 26, 28 formé sur le substrat ; les extrémités de ces conducteurs 26, 28 sont proches l'une de l'autre mais séparées pour qu'il n'y ait pas de contact électrique direct entre elles et donc pas de possibilité de passage de courant. Lorsque l'extrémité de l'électrode mobile se rapproche du substrat, elle vient en contact à la fois avec les deux extrémités de conducteurs 26 et 28 et les relie électriquement l'un à l'autre, établissant un court-circuit entre les plots 16 et 18.

[0038] De préférence, un plot de contact conducteur 30 est formé sous la traverse 24 pour faciliter cette mise en contact. Le plot est de préférence isolé des plaques conductrices pour que l'établissement du contact ne mette pas les conducteurs 26 et 28 au potentiel imposé à l'électrode mobile par la tension de commande.

[0039] A titre d'exemple, les électrodes fixes sont gravées dans une couche de silicium polycristallin dopé, et les électrodes mobiles dans une couche de nickel-fer. L'épaisseur d'une plaque fixe ou mobile est d'environ 5 micromètres, l'intervalle entre une plaque fixe et une plaque mobile est de 1 à 2 micromètres, identique de chaque côté de la plaque fixe et identique pour toutes les plaques fixes ; il y a entre 20 et 50 plaques fixes et s'il y a N plaques fixes, il y a N+1 ou N-1 plaques mobiles interdigitées avec les plaques fixes. La longueur des plaques peut être typiquement de 300 à 700 micromètres et l'amplitude de déplacement de l'extrémité libre de l'électrode mobile peut être de 1 à 5 micromètres. L'espacement entre l'extrémité d'une plaque fixe et la traverse 22 ou 24 peut être de préférence de 2 à 5 micromètres. La hauteur des plaques peut être de 5 à 20 micromètres. La tension de commande continue est comprise entre 1 volt et 10 volts. La force de contact obtenue peut être de l'ordre de 10^{-4} newtons ; elle ne dépend pas de la hauteur des plaques ni de leur hauteur de recouvrement mutuel, mais elle dépend (quadratiquement) de la tension appliquée, de la longueur des plaques, de leur nombre, et de l'intervalle entre plaques fixes et plaques mobiles ; elle dépend aussi de la distance verticale entre les plaques mobiles et la couche conductrice éventuellement présente entre les plaques fixes.

[0040] L'interrupteur est ouvert dans sa position de repos en l'absence de tension de commande ; le maintien dans la position fermée de l'interrupteur se fait en maintenant la tension de commande, sans consommation de courant ; le retour en position ouverte se fait en supprimant la tension de commande, la force de rappel de la plaque de flexion ou des barres de torsion ramenant l'électrode mobile à sa position de repos écartée du substrat.

[0041] De préférence, pour augmenter la force d'attraction entre les plaques fixes et les plaques mobiles dans la direction verticale, on prévoit que les plaques fixes reposent sur une couche conductrice continue 50 qui est reliée au même potentiel que les plaques fixes. Cette couche est présente dans l'intervalle entre les plaques fixes et par conséquent tend à attirer uniformément

vers le bas toutes les plaques PM constituant l'électrode mobile du fait que ces plaques sont situées juste au-dessus de cette couche.

[0042] Dans ce qui précède, on a considéré que l'électrode mobile établit un contact entre deux conducteurs 26 et 28 formés sur le substrat lorsque l'extrémité de l'électrode vient toucher le substrat. On pourrait aussi envisager que le contact se fasse entre un plot 30 de l'électrode mobile et un seul contact 28 du substrat, pour établir une connexion entre le plot 30 et le contact 28, à condition d'isoler le chemin de courant ainsi établi du chemin d'application de la tension de commande. Le chemin de courant du contact établi passe alors lui aussi par le pied d'ancrage et les barres de torsion ou plaques de flexion, mais en restant séparé du chemin de courant de la tension de commande.

[0043] La figure 4 et la figure 5 représentent schématiquement le détail des forces qui s'exercent entre les plaques conductrices fixes PF et les plaques conductrices mobiles PM (dans le cas où il y a N+1 plaques fixes pour N plaques mobiles, ce qui est préférable pour symétriser les forces qui s'exercent sur les plaques mobiles). Les flèches représentent ces forces, la convention étant que le sens de la flèche représente le sens de la force d'attraction exercée sur une plaque mobile par un élément fixe.

[0044] La figure 4 représente, sous forme de schéma simplifié, une coupe transversale des plaques conductrices, perpendiculaire à la coupe de la figure 2. Les forces horizontales qui s'exercent entre les parties en recouvrement mutuel des plaques se compensent toutes. Les forces qui s'exercent entre les parties qui ne sont pas en recouvrement sont symétriques mais ont une résultante vers le bas. Enfin, une force verticale s'exerce entre le bas des plaques mobiles et le conducteur 50 qui est situé entre les plaques fixes et au même potentiel que ces dernières. Cette dernière force est plus importante lorsque l'interrupteur est dans l'état fermé puisque les plaques mobiles se sont rapprochées du substrat. Elle contribue donc à mieux assurer le maintien de l'interrupteur en position fermée. Mais elle disparaît instantanément lorsque la tension de commande est supprimée, et elle ne s'oppose donc pas au retour de l'interrupteur en position ouverte sous l'effet des forces de rappel élastiques.

[0045] La figure 5 représente une coupe verticale simplifiée (parallèlement au plan des plaques) dans laquelle on voit une plaque conductrice fixe PF et les traverses d'extrémité 22 et 24 qui relient les plaques mobiles. Les plaques mobiles ne sont pas représentées. Outre la force verticale qui s'exerce entre les traverses et la couche conductrice 50, et les composantes verticales des forces qui s'exercent entre une traverse et une extrémité de plaque fixe, on a des composantes horizontales de forces. Mais ces composantes horizontales sont contrebalancées par des forces horizontales entre l'autre extrémité de la plaque et l'autre traverse. Les plaques sont donc bien maintenues dans leur plan et la résultante globale des forces reste bien verticale.

[0046] On remarquera qu'un avantage de la structure d'électrodes interdigitées avec recouvrement partiel de la hauteur des plaques fixes et mobiles est le fait que la force d'actionnement verticale créée entre les plaques mobiles et fixes est élevée et ne dépend pas de l'inclinaison de l'électrode mobile dès lors que le bas des plaques conductrices mobiles reste entre les plaques fixes et le haut des plaques fixes reste entre les plaques mobiles.

[0047] L'actionneur représenté sur les figures 1 à 3 ne fonctionne pas avec une commande symétrique en ce sens que le basculement est obtenu à partir d'une position de rappel neutre vers une position active par l'application d'une tension de commande, et retour à la position de commande grâce aux forces de rappel élastique de l'articulation lorsque la tension de commande est annulée.

[0048] On peut aussi réaliser un actionneur à commande symétrique ayant une première tension de commande pour faire passer l'actionneur dans un premier état et une deuxième tension de commande pour faire passer l'actionneur dans un autre état. Ceci peut être obtenu en prévoyant deux couples d'électrodes fixes (plaques conductrices PF et PF') et mobiles (plaques conductrices PM et PM'). La figure 6 représente une telle réalisation. Les deux électrodes mobiles sont identiques et articulées de part et d'autre d'une même articulation ART. Les deux électrodes mobiles sont solidaires l'une de l'autre de sorte que le déplacement de l'une vers le bas entraîne le déplacement de l'autre vers le haut. Une première tension de commande est appliquée entre l'électrode fixe et l'électrode mobile d'un couple situé d'un côté de l'articulation et rapproche du substrat l'extrémité distale de cette électrode mobile, éloignant du substrat l'extrémité distale de l'autre électrode mobile. Une deuxième tension de commande peut être appliquée entre l'électrode mobile et l'électrode fixe du deuxième couple, et rapproche du substrat l'extrémité distale de la deuxième électrode mobile, éloignant la première électrode mobile du substrat.

[0049] On a ainsi une commande symétrique. On peut s'en servir pour réaliser un interrupteur double symétrique ayant un contact ouvert lorsque l'autre est fermé et réciproquement. La figure 6 représente une telle structure d'interrupteur à commande symétrique et à double contact symétrique. Des contacts 28', 30' correspondant aux références 28 et 30 de la première électrode mobile sont prévus à l'extrémité de la deuxième électrode mobile. Les tensions de commande symétriques sont amenées par exemple aux deux électrodes fixes par un plot 12 et aux deux électrodes mobiles par deux autres plots tels que le plot 14 de la figure 1, un seul de ces deux plots recevant une tension de commande à un moment donné. Les plots de commande ne sont pas représentés sur la figure 6.

[0050] Dans une réalisation particulière, on peut prévoir que l'actionneur à commande symétrique, compre-

nant deux électrodes fixes et deux électrodes mobiles solidaires l'une de l'autre, est à maintien magnétique. Le maintien magnétique peut être obtenu en prévoyant que le matériau ou une partie du matériau des électrodes mobiles est magnétique, avec un aimant situé au-dessus ou au-dessous du substrat, qui maintient le groupe d'électrodes mobiles du côté où il a basculé. L'aimant produit un champ magnétique vertical et le sens d'aimantation de la couche magnétique de l'élément mobile dépend de l'inclinaison (donc du sens de basculement) de l'élément mobile. Le champ magnétique maintient alors de manière stable l'interrupteur dans sa position de basculement. On peut couper la tension de commande après basculement, sans que cette coupure ramène les électrodes mobiles dans leur position de repos, à la condition bien sûr que la force d'aimantation qui agit sur l'électrode mobile pour la maintenir dans le sens où elle est inclinée soit supérieure à la force de rappel de l'articulation élastique. Avec un maintien magnétique, la consommation d'énergie électrique dans un état stable est rigoureusement nulle. La force du contact électrique établi par l'interrupteur dépend de la force d'aimantation. Il faut bien sûr trouver un compromis entre la force d'aimantation en position de maintien et la force électrostatique nécessaire pour sortir d'une position stable de l'interrupteur.

[0051] Pour une telle réalisation, le matériau conducteur qui constitue les plaques conductrices des deux électrodes mobiles peut être réalisé en matériau magnétique tel que du fer-nickel qui est à la fois magnétique et électriquement conducteur. Un revêtement des électrodes mobiles conductrices par une couche magnétique peut aussi être suffisant. De plus, pour que l'effet de maintien magnétique soit plus efficace, il est souhaitable de prévoir une couche de matériau magnétique (appelée couche douce, de préférence en FeNi), de l'autre côté de l'électrode mobile. Cette couche peut être déposée sur le substrat 10 avant la formation des électrodes fixes et mobiles. L'aimant crée un champ magnétique qui aimante l'électrode mobile préférentiellement dans le sens du côté fermé, ce qui permet le maintien magnétique.

[0052] La figure 7 représente une structure avec un aimant permanent 60 placé au-dessus des électrodes fixes et mobiles et une couche magnétique douce 102 en Fer-nickel déposée sur le substrat 10 au-dessous de ces électrodes.

[0053] Au lieu d'un aimant placé au-dessus ou au-dessous de la structure avec une couche magnétique douce renforçant son action, on peut prévoir que des aimants sont intégrés directement dans le substrat. On sait déposer en couche mince des aimants à la surface d'un substrat ou dans des puits creusés dans la surface du substrat. On donne à ces aimants une aimantation d'orientation verticale. On peut par exemple prévoir un aimant à chaque extrémité de l'électrode mobile, ou un unique aimant sous l'ensemble de l'électrode mobile. Les aimants peuvent être en composé NdFeB (néodyme-ferbore) ou en samarium -cobalt et on peut atteindre des inductions rémanentes de l'ordre d'un dixième de Tesla à un Tesla. Le dépôt se fait par électro-déposition ou pulvérisation cathodique. Des dépôts de couches aimantées de 10 à 50 micromètres d'épaisseur sont techniquement réalisables et permettent d'assurer un maintien magnétique suffisant. Ces couches aimantées nécessitent un recuit à des températures d'environ 700°C, et on les réalisera donc avant de former les empilements de couches constituant les électrodes fixes et mobiles.

[0054] La figure 8 représente une structure à aimants intégrés, à deux aimants 62 et 62' incorporés au substrat et placés respectivement à l'aplomb de l'extrémité des deux électrodes mobiles.

[0055] L'avantage des aimants intégrés est que l'encombrement est plus faible car on peut supprimer l'aimant 60 et les moyens de fixation de cet aimant sur la structure. De plus on n'a plus besoin de prévoir une étape de formation d'une couche magnétique douce (102, figure 7) sur le substrat. Enfin, le comportement en radiofréquence (pour les applications en radiofréquence) est meilleur.

[0056] Toutes ces structures d'actionneurs simples ou doubles, à commande simple ou symétrique peuvent être utilisées non seulement pour des interrupteurs électriques mais aussi pour d'autres applications où un petit déplacement de la partie mobile (quelques micromètres) est utile, notamment pour des interrupteurs optiques. Dans ce cas, l'électrode mobile peut porter un miroir de renvoi placé sur le trajet d'un faisceau lumineux et qui modifie ou interrompt le chemin optique de ce faisceau lumineux en fonction de l'état de basculement de l'électrode mobile donc en fonction de l'angle que forme la surface du miroir avec le plan du substrat.

[0057] Pour réaliser les plaques conductrices interdigitées selon l'invention, on peut par exemple procéder de la manière suivante, dans le cas d'un actionneur à maintien magnétique :

On part d'un substrat semiconducteur en silicium 100 (figure 9) et on dépose sur ce substrat une couche magnétique mince 102 en nickel-fer qui servira à répartir le champ magnétique de l'aimant qu'on placera ultérieurement au-dessus ou au-dessous du substrat.

[0058] On dépose ensuite et on grave des couches isolantes et conductrices 104 servant à établir un motif d'interconnexion entre les plaques fixes et un plot de commande, ainsi que la couche conductrice éventuellement présente entre les plaques fixes. Le détail de ces couches n'est pas représenté. On dépose ensuite une couche de silicium polycristallin 106 servant à fabriquer les plaques fixes. On recouvre l'ensemble d'une couche d'oxyde de silicium 108 et d'une couche de résine 110 qu'on photograve pour définir le motif de plaques conductrices fixes. Figure 9A.

[0059] On grave dans la couche d'oxyde 108 et dans la couche de silicium 106 le motif de plaques parallèles

conductrices fixes. Figure 9B.

[0060] On dépose une couche isolante 112 (dans le même matériau que la couche 108), qui servira d'espaceur latéral entre les plaques mobiles et les plaques fixes et d'espaceur vertical entre les plaques mobiles et le substrat. Le profil de cette couche comporte des ouvertures entre les plaques parallèles conductrices fixes, ouvertures qui serviront à recevoir le matériau des plaques conductrices mobiles. Figure 9C.

[0061] On dépose une fine couche de nickel 114 (0,1 micromètre) sur la couche 112 ; cette couche de nickel constitue un germe de croissance (en anglais "seed layer") qui permettra ultérieurement une croissance électrolytique de nickel-fer. Figure 9D.

[0062] On fait croître électrolytiquement une couche de nickel-fer (80%/20%) 116 d'environ 8 à 10 micromètres d'épaisseur qui vient remplir les ouvertures de la couche 112 pour constituer les plaques conductrices mobiles entre les plaques fixes. Figure 9E.

[0063] On élimine localement la partie supérieure de cette couche pour ne garder que les plaques conductrices parallèles et les traverses qui les relient ; les traverses ne sont pas visibles sur la figure. On conserve les parties qui peuvent servir à l'articulation de l'électrode mobile, et en particulier l'ancrage de l'articulation sur le substrat. Figure 9F

[0064] Enfin, on élimine les couches d'oxyde de silicium 108 et 112 pour libérer les plaques mobiles PM formées par la couche 116 ; on aboutit à deux séries de plaques conductrices interdigitées à recouvrement mutuel partiel, dont l'une est solidaire du substrat et l'autre est libre.

[0065] L'articulation la plus simple dans ce cas est constituée par une plaque de flexion mince verticale, constituée en même temps que les plaques mobiles mais formée dans une ouverture de la couche 112 pour venir en contact avec le substrat fixe.

[0066] Dans le cas où on veut former des aimants intégrés, on ne formera pas la couche magnétique douce 102 mais on formera à la place les aimants intégrés. Les aimants intégrés sont de préférence enfoncés dans le substrat pour affleurer sur sa surface.

[0067] Dans une première technique (électrodéposition) on peut graver des ouvertures dans le substrat aux emplacements des aimants, déposer une électrode dans ces ouvertures, et placer le substrat dans un bain électrolytique contenant les ions métalliques qui constitueront l'aimant. On peut ainsi former notamment un composé magnétique CoPt qui vient se déposer par voie électrolytique sur les électrodes placées au fond des ouvertures. Un recuit assure une orientation cristalline verticale du matériau, ce qui facilite l'aimantation permanente ultérieure dans le sens vertical.

[0068] Dans une deuxième technique (pulvérisation cathodique) on utilise la condensation sur le substrat d'une phase vapeur des métaux composant la couche aimantée à réaliser, notamment du NdFeB (néodyme, fer, bore). Le procédé de réalisation des aimants peut comprendre les étapes suivantes : à partir d'une plaquette de silicium, on effectue une étape de photolithographie pour définir dans le silicium des ouvertures aux emplacements des aimants, sans enlever la résine de photolithographie ; puis on dépose une couche de SiO_2 et une couche de tantale, et on enlève le tantale en dehors des ouvertures en enlevant la résine de photolithographie sur laquelle le tantale repose ; le tantale sert de couche barrière au fond des ouvertures ; on dépose un composé NdFeB, par exemple $Nd_2Fe_{14}B$ par pulvérisation cathodique en plasma sous argon ; le dépôt peut être fait à 400°C, produisant une couche amorphe de NdFeB et peut être suivi d'un recuit à 750°C assurant une cristallisation du composé dans un sens vertical propre à faciliter l'aimantation verticale.

Revendications

1. Actionneur électromécanique miniature à commande électrostatique qui comprend un substrat fixe (10) et un élément mobile articulé sur le substrat de manière à permettre un déplacement d'une partie de l'élément mobile dans une première direction choisie (Z), une série de plaques conductrices parallèles (PM) sur l'élément mobile, dont la hauteur s'étend dans la première direction et qui sont espacées régulièrement dans une deuxième direction perpendiculaire à la première, et une autre série de plaques conductrices parallèles (PF) sur le substrat fixe, les deux séries de plaques étant interdigitées symétriquement l'une dans l'autre et en recouvrement mutuel sur une partie de leur hauteur de manière qu'une tension électrique de commande appliquée entre les deux séries produise une force électrostatique ayant une composante selon la hauteur des plaques dans la première direction, les plaques ayant des extrémités opposées dans une troisième direction perpendiculaire aux deux premières, **caractérisé en ce que** les extrémités opposées des plaques de l'une des séries sont solidaires mécaniquement et électriquement de deux traverses d'extrémité (22, 24) qui viennent en regard des extrémités opposées des plaques de l'autre série.

2. Actionneur selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** la série de plaques qui est solidaire des traverses est celle qui fait partie de l'élément mobile.

3. Actionneur selon l'une des revendications 1 et 2, **caractérisé en ce que** les plaques sont planes et allongées dans la troisième direction.

4. Actionneur selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** la direction de déplacement est perpendiculaire à la surface du substrat.

5. Actionneur selon l'une des revendications 1 à 4, **ca-**

ractérisé en ce que les deux traverses d'extrémité solidaires d'une série de plaques sont situées exactement à égale distance des deux extrémités opposées d'une plaque de l'autre série, et cette distance est la même pour toutes les plaques de l'autre série.

6. Actionneur selon l'une des revendications 1 à 5, **caractérisé en ce que** l'élément mobile comporte une partie conductrice (30) pouvant ou non venir en contact avec au moins un conducteur porté par le substrat fixe selon la tension de commande appliquée à l'actionneur.

7. Actionneur selon l'une des revendications 1 à 6, **caractérisé en ce que** l'élément mobile de l'actionneur est agencé de manière symétrique de part et d'autre d'une articulation de l'élément mobile, à la manière d'une bascule, et il comporte deux séries de plaques conductrices mobiles interdigitées chacune avec une série respective de plaques conductrices fixes, et des moyens pour appliquer une tension de commande soit entre une première série de plaques conductrices mobiles et une première série correspondante de plaques conductrices fixes, soit entre une deuxième série de plaques conductrices mobiles et une deuxième série correspondante de plaques conductrices fixes.

8. Actionneur selon la revendication 7, **caractérisé en ce qu'**il comporte deux contacts électriques symétriques ouverts ou fermés par l'application d'une tension de commande, l'un étant ouvert lorsque l'autre est fermé et réciproquement.

9. Actionneur selon l'une des revendications 7 et 8, **caractérisé en ce qu'**il est pourvu de moyens de maintien magnétique de l'élément mobile en position stable, comprenant un matériau magnétisable dans l'élément mobile et un aimant permanent associé à l'élément fixe, l'aimant créant dans le matériau magnétisable un champ magnétique dans un sens ou dans un autre en fonction de l'inclinaison de l'élément mobile par rapport au substrat.

10. Actionneur selon la revendication 9, **caractérisé en ce que** l'aimant permanent (60) est placé au-dessus de l'élément mobile et une couche en matériau magnétique (102) est placée au-dessous de l'élément fixe.

11. Actionneur selon la revendication 9, **caractérisé en ce que** l'aimant permanent est intégré au substrat fixe, au-dessous de l'élément fixe et de l'élément mobile.

12. Actionneur selon l'une des revendications 1 à 11, **caractérisé en ce qu'**il comporte une couche conductrice continue formée sur le substrat entre les plaques conductrices fixes et placée au même potentiel que ces plaques, pour créer une force d'attraction électrostatique supplémentaire attirant les plaques conductrices de l'élément mobile vers le substrat.

Patentansprüche

1. Elektromechanischer Miniaturstellantrieb mit elektrostatischer Steuerung, der Folgendes umfasst: ein festes Substrat (10) und ein bewegliches Element, das so an das Substrat angelenkt ist, dass ein Teil des beweglichen Elements in einer gewählten ersten Richtung (Z) verschoben werden kann, eine Serie von parallelen leitenden Platten (PM) auf dem beweglichen Element, deren Höhe in der ersten Richtung verläuft und die in einer zweiten Richtung senkrecht zur ersten regelmäßig verteilt sind, und eine weitere Serie von parallelen leitenden Platten (PF) auf dem festen Substrat, wobei die zwei Plattenserien symmetrisch ineinander geschoben sind und sich gegenseitig auf einem Teil ihrer Höhe verdecken, so dass eine zwischen die beiden Serien angelegte elektrische Steuerspannung eine elektrostatische Kraft mit einer Komponente in der Höhe der Platten in der ersten Richtung erzeugt, wobei die Platten gegenüberliegende Enden in einer dritten Richtung senkrecht zu den zwei ersten haben, **dadurch gekennzeichnet, dass** die gegenüberliegenden Enden der Platten von einer der Serie mechanisch und elektrisch mit zwei Endtraversen (22, 24) fest verbunden sind, die sich gegenüber den gegenüberliegenden Enden der Platten der anderen Serie befinden.

2. Stellantrieb nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die mit den Traversen fest verbundene Plattenserie diejenige ist, die einen Teil des beweglichen Elements bildet.

3. Stellantrieb nach einem der Ansprüche 1 und 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Platten eben und in der dritten Richtung langgestreckt sind.

4. Stellantrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Verschiebungsrichtung senkrecht zur Oberfläche des Substrats ist.

5. Stellantrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich die zwei mit einer Plattenserie fest verbundenen Endtraversen genau im gleichen Abstand von zwei gegenüberliegenden Enden einer Platte der anderen Serie befinden, wobei dieser Abstand für alle Platten der anderen Serie gleich ist.

6. Stellantrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **da-**

durch gekennzeichnet, dass das bewegliche Element einen leitenden Teil (30) umfasst, der mit wenigstens einem von dem festen Substrat getragenen Leiter gemäß der an den Stellantrieb angelegten Steuerspannung in Kontakt kommen kann oder nicht.

7. Stellantrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** das bewegliche Element des Stellantriebs symmetrisch auf beiden Seiten eines Gelenks des beweglichen Elements in der Art einer Wippe ausgestaltet ist und zwei Serien von beweglichen leitenden, mit einer jeweiligen Serie von festen leitenden Platten ineinandergeschobenen Platten und Mittel zum Anlegen einer Steuerspannung entweder zwischen einer ersten Serie von beweglichen leitenden Platten und einer ersten entsprechenden Serie von festen leitenden Platten oder zwischen einer zweiten Serie von beweglichen leitenden Platten und einer zweiten entsprechenden Serie von festen leitenden Platten umfasst.

8. Stellantrieb nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** er zwei symmetrische elektrische Kontakte umfasst, die durch das Anlegen einer Steuerspannung geöffnet oder geschlossen werden, wobei einer geöffnet wird, wenn der andere geschlossen ist, und umgekehrt.

9. Stellantrieb nach einem der Ansprüche 7 und 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** er mit magnetischen Mitteln zum Halten des beweglichen Elements in einer stabilen Position versehen ist, umfassend ein magnetisierbares Material in dem beweglichen Element, und einem mit dem festen Element assoziierten Permanentmagnet, wobei der Magnet in dem magnetisierbaren Material ein magnetisches Feld in der einen oder anderen Richtung in Abhängigkeit von der Neigung des beweglichen Elements in Bezug auf das Substrat erzeugt.

10. Stellantrieb nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Permanentmagnet (60) über dem beweglichen Element platziert ist und eine Schicht aus magnetischem Material (102) unterhalb des festen Elements platziert ist.

11. Stellantrieb nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Permanentmagnet mit dem festen Substrat unterhalb des festen Elements und des beweglichen Elements integriert ist.

12. Stellantrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** er eine kontinuierliche leitende Schicht umfasst, die auf dem Substrat zwischen den festen leitenden Platten gebildet und auf dasselbe Potential wie diese Platten gesetzt ist, um eine ergänzende elektrostatische Anziehungskraft zu erzeugen, die die leitenden Platten des beweglichen Elements zum Substrat hin anzieht.

Claims

1. An electrostatically controllable micro-electromechanical actuator comprising a stationary substrate (10) and a movable element hinged on the substrate so that a part of the movable element can move in a first chosen direction (Z), a set of parallel conducting plates (PM) on the movable element, the height of which plates extends in the first direction and which are regularly spaced in a second direction perpendicular to the first, and another set of parallel conducting plates (PF) on the stationary substrate, the two sets of plates being symmetrically interdigitated with each other and partially overlapping heightwise so that a control voltage applied between the two sets produces an electrostatic force having a component along the height of the plates in the first direction, the plates having opposite ends in a third direction perpendicular to the first two, **characterized in that** the opposite ends of the plates of one of the sets are electrically and mechanically secured to the two end crosspieces (22, 24) which lie facing the opposite ends of the plates of the other set.

2. The actuator as claimed in claim 1, **characterized in that** the set of plates secured to the crosspieces is the set belonging to the movable element.

3. The actuator as claimed in either of claims 1 and 2, **characterized in that** the plates are planar and elongate in the third direction.

4. The actuator as claimed in one of claims 1 to 3, **characterized in that** the direction of movement is perpendicular to the surface of the substrate.

5. The actuator as claimed in one of claims 1 to 4, **characterized in that** the two secured end crosspieces of one set of plates are located at precisely the same distance from the two opposite ends of a plate of the other set, and this distance is the same for all the plates of the other set.

6. The actuator as claimed in one of claims 1 to 5, **characterized in that** the movable element comprises a conducting part (30) that may optionally make contact with at least one conductor borne by the stationary substrate depending on the control voltage applied to the actuator.

7. The actuator as claimed in one of claims 1 to 6, **characterized in that** the movable element of the actuator is arranged symmetrically on either side of a hinge of the movable element, like a see-saw, and

it comprises two sets of mobile conducting plates each interdigitated with a respective set of stationary conducting plates and means for applying a control voltage either between a first set of mobile conducting plates and a corresponding first set of stationary conducting plates or between a second set of mobile conducting plates and a corresponding second set of stationary conducting plates.

8. The actuator as claimed in claim 7, **characterized in that** it comprises two symmetric electrical contacts opened or closed by applying a control voltage, one being open when the other is closed and vice versa.

9. The actuator as claimed in either of claims 7 and 8, **characterized in that** it is provided with magnetic retention means for maintaining the movable element in a stable position, comprising a magnetizable material in the movable element and a permanent magnet associated with the stationary element, the magnet creating in the magnetizable material a magnetic field in one direction or in another, depending on the inclination of the movable element relative to the substrate.

10. The actuator as claimed in claim 9, **characterized in that** the permanent magnet (60) is placed above the movable element and a layer of magnetic material (102) is placed beneath the stationary element.

11. The actuator as claimed in claim 9, **characterized in that** the permanent magnet is integrated into the stationary substrate, beneath the stationary element and the movable element.

12. The actuator as claimed in one of claims 1 to 11, **characterized in that** it comprises, formed on the substrate between the stationary conducting plates, a continuous conducting film held at the same voltage as these plates, creating a supplementary electrostatic force of attraction that attracts the conducting plates of the movable element toward the substrate.

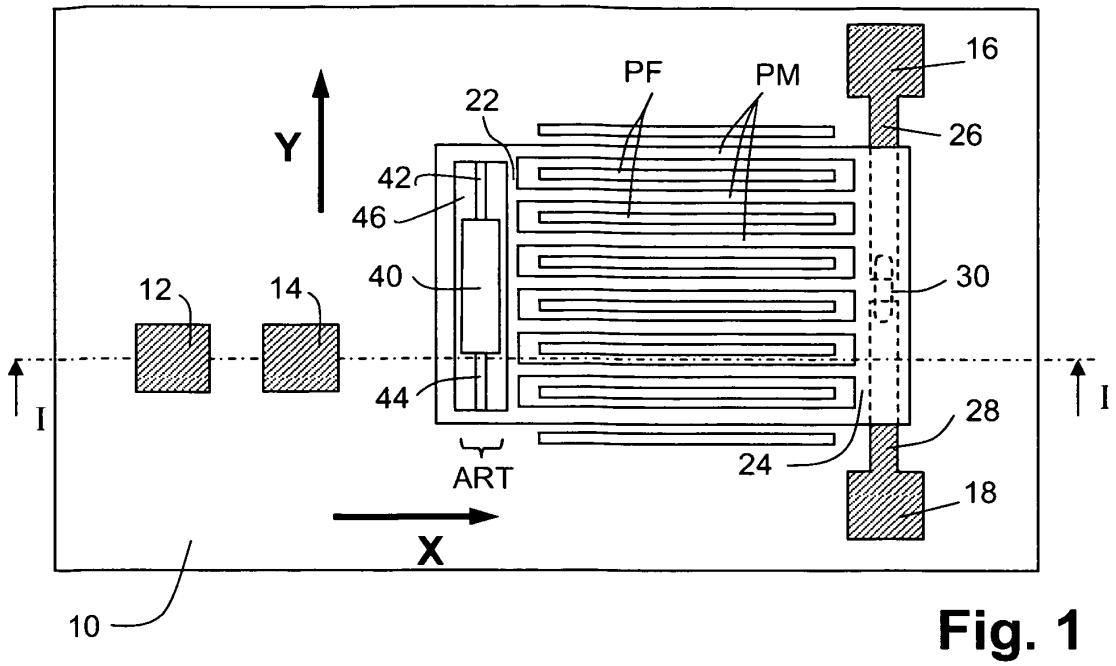


Fig. 1

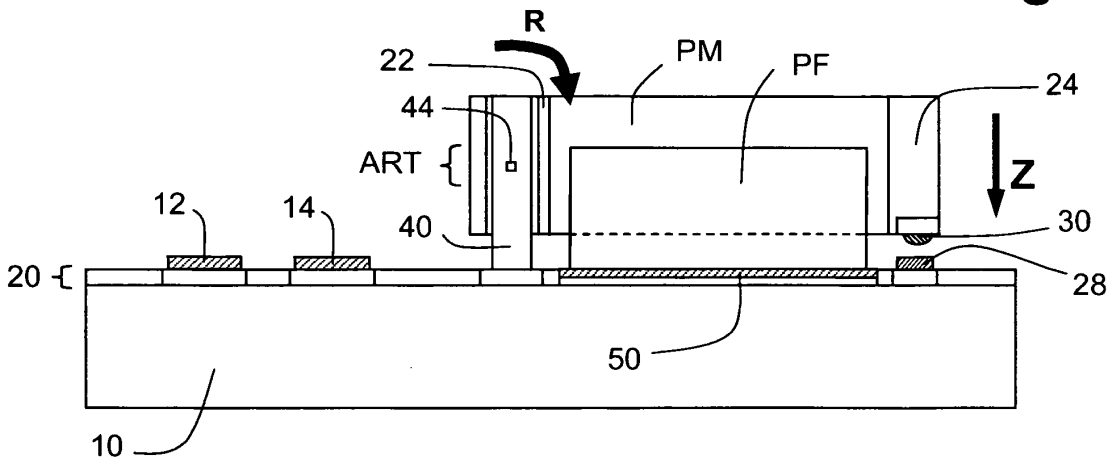


Fig. 2

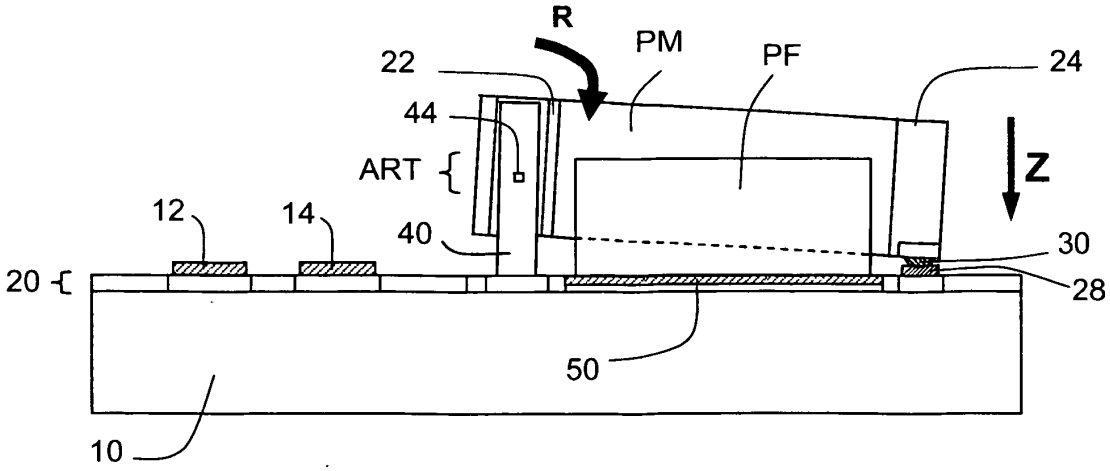


Fig. 3

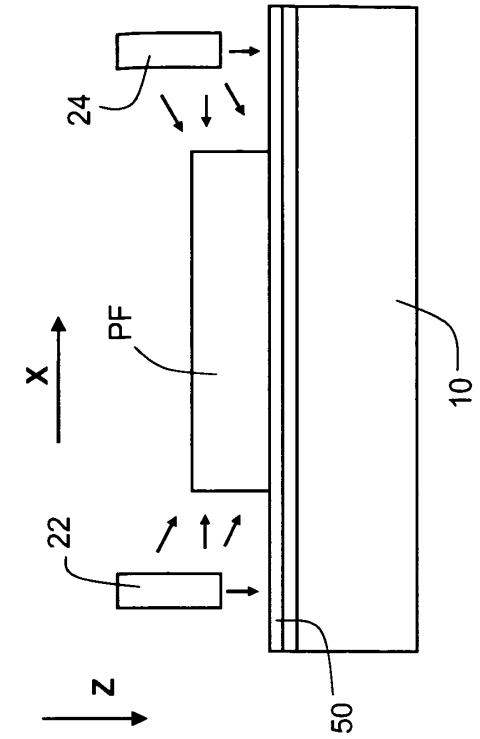


Fig. 5

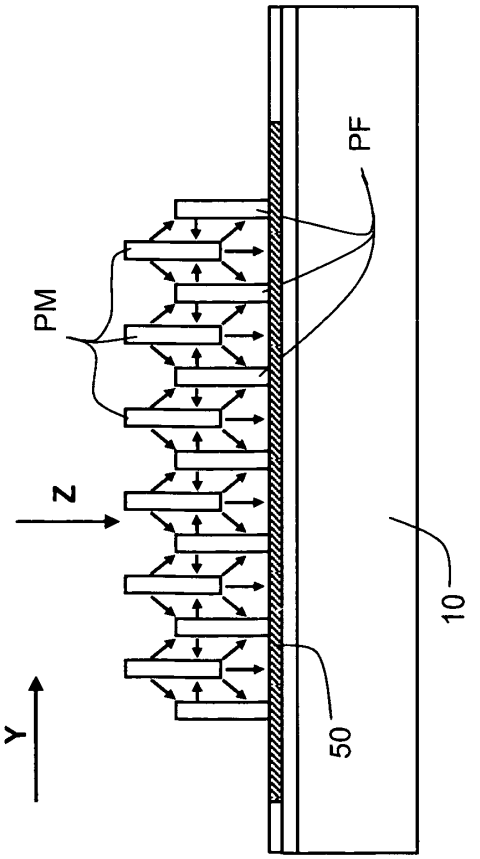


Fig. 4

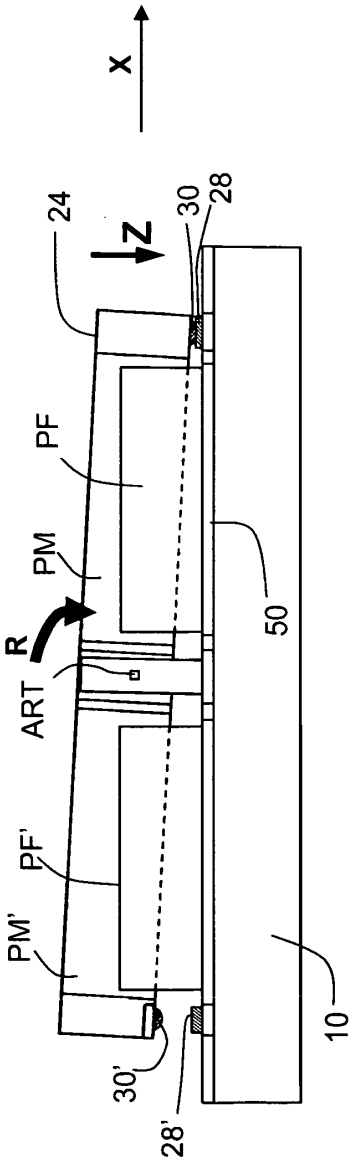


Fig. 6

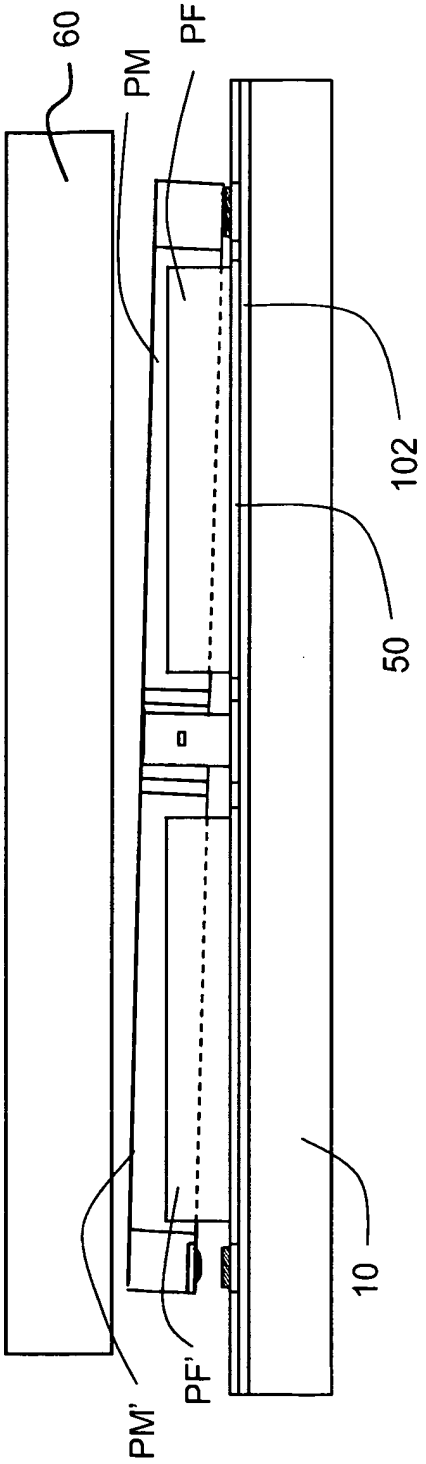


Fig. 7

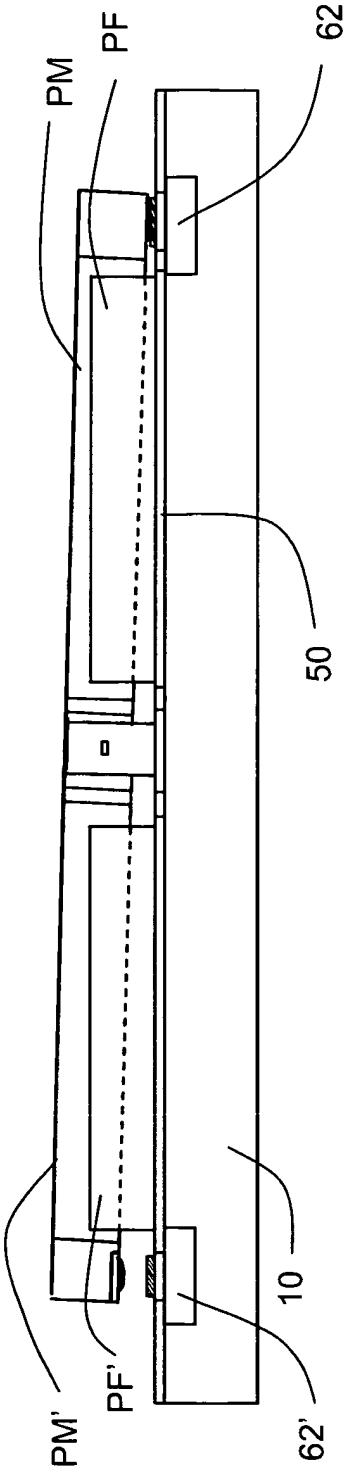


Fig. 8

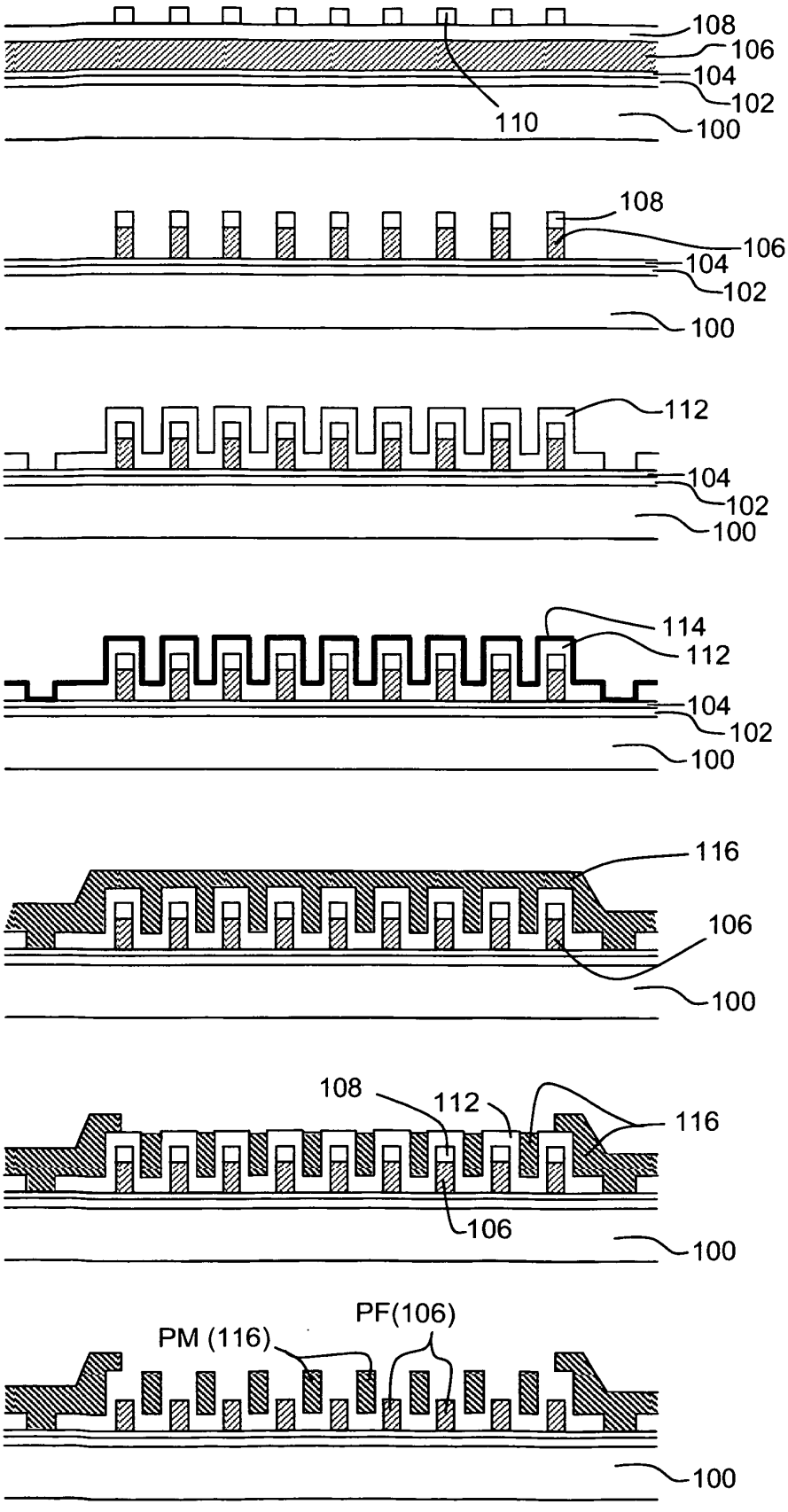

108
106
104
102
110
100
9A
108
106
104
102
100
9B
112
104
102
100
9C
114
112
104
102
100
9D
116
106
100
9E
108
112
116
106
100
9F
PF(106)
PM (116)
100
9G

Fig. 9

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- US 7071431 B **[0003]**
- US 2002145493 A1 **[0003]**