



(11) **EP 2 022 129 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
08.02.2017 Bulletin 2017/06

(21) Numéro de dépôt: **07729756.2**

(22) Date de dépôt: **31.05.2007**

(51) Int Cl.:
H01P 1/38 (2006.01) H01P 1/12 (2006.01)

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/EP2007/055355

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2007/138101 (06.12.2007 Gazette 2007/49)

(54) **CIRCULATEUR RADIOFREQUENCE OU HYPERFREQUENCE**

HOCHFREQUENZ- ODER HYPERFREQUENZ-ZIRKULATOR

RADIOFREQUENCY OR HYPERFREQUENCY CIRCULATOR

(84) Etats contractants désignés:
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
HU IE IS IT LI LT LU LV MC MT NL PL PT RO SE
SI SK TR**

(30) Priorité: **31.05.2006 FR 0604857**

(43) Date de publication de la demande:
11.02.2009 Bulletin 2009/07

(73) Titulaire: **THALES**
92200 Neuilly sur Seine (FR)

(72) Inventeur: **ZIAEI, Afshin**
92170 Vanves (FR)

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

(56) Documents cités:
WO-A-2004/030005 US-A1- 2002 053 954
US-A1- 2003 107 137 US-A1- 2003 132 522
US-A1- 2004 127 178 US-B1- 6 580 337

EP 2 022 129 B1

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).

Description

[0001] Le domaine de l'invention est celui des circulateurs radiofréquence RF et de leurs applications dans des systèmes de télécommunication radiofréquence ou hyperfréquence tel que les systèmes radars, ou de téléphonie sans fil.

[0002] Un circulateur RF est un dispositif à n ports, permettant à un signal RF de circuler dans une seule direction. On considère un circulateur avec trois ports p1, p2, p3. Un signal injecté dans un port p1 est transmis au port p2 et isolé du port p3, tandis qu'un signal entrant via le port p2 est transmis au port p3 et isolé du port p1. On a ainsi un découplage des signaux émis et reçus. Une illustration symbolique correspondante d'un tel circulateur dont le port p2 est relié à une antenne est donnée sur les figures 1 a et 1 b. Si le circulateur C reçoit sur le port p1 adapté en impédance un signal radiofréquence, on aura un chemin à faible pertes d'insertion dans le sens des aiguilles d'une montre et l'on observera de fortes pertes dans le sens opposé. La puissance sera donc dirigée quasiment sans pertes vers le port p2 et rayonnée par l'antenne. La même chose s'applique du port p2 vers le port p3, et du port p3 vers le port p1. Le circulateur a ainsi pour qualités essentielles de transmettre sans pertes dans un sens donné et d'atténuer très fortement les ondes réfléchies.

[0003] Les circulateurs sont notamment utilisés dans les systèmes de télécommunication ou radars, selon le principe illustré sur la figure 2. Un système de télécommunication comporte principalement une partie centrale de traitement de signal assurant notamment des fonctions d'atténuation AT et de déphasage D, typiquement mises en oeuvre par des circuits électroniques numériques (puces), associée à un étage émetteur E, un étage récepteur R et une antenne A.

[0004] L'étage émetteur E comprend principalement un amplificateur DRA (pour *"Digital Research Amplifier"*), un amplificateur HPA (pour *"High Power Amplifier"*), et un isolateur I. Un isolateur est un cas particulier de circulateur. Une charge 50 ohms est connectée sur l'un des ports (souvent le port 3 par convention). Quelle que soit l'impédance du circuit connecté en sortie sur le deuxième port p2, il n'y a pratiquement aucun retour vers l'émetteur (port p1) : la majeure partie de la puissance retournée ou couplée est dissipée par la charge connectée en p3. Un isolateur est généralement utilisé afin de limiter au maximum les retours de signal sur la sortie du HPA. En effet, tout signal arrivant sur la sortie du HPA pourrait entraîner un dysfonctionnement important voir même la destruction de ce composant.

[0005] L'étage récepteur R comprend un circuit limiteur de bande passante LIM et un amplificateur de signal noté généralement LNA (Low Noise Amplifier).

[0006] Un circulateur C à trois voies (ou ports) p1, p2, p3 piloté par un circuit électronique d'activation non représenté, permet de transférer un signal radiofréquence fourni par l'étage émetteur vers l'antenne A (transmission

p1 vers p2, p3 étant isolé), ou de transmettre un signal capté par l'antenne vers l'étage récepteur (transmission p2 vers p3, p1 étant isolé).

[0007] Le circulateur radiofréquence C doit avoir notamment les caractéristiques contraignantes suivantes : avoir des temps de commutation rapides ; supporter la forte puissance radiofréquence des signaux à transmettre vers l'antenne ; avoir des pertes par insertion limitées.

[0008] Selon l'état de l'art, les circulateurs radiofréquence utilisés sont des structures volumineuses à ferrite et à aimant permanent qui impose un sens de giration électromagnétique.

[0009] Ces circulateurs ferromagnétiques ont cependant différents inconvénients. Ce sont des composants très coûteux. Ils ne sont pas facilement reproductibles, car ils nécessitent une intervention humaine pour un réglage correct. Leur structure est très volumineuse. Ils occupent de l'ordre de 80 % de la place dans un système de télécommunication. Ils consomment beaucoup de puissance électrique, et par conséquent posent des problèmes de dissipation thermique. Ils introduisent des pertes par insertion (pertes de puissance radiofréquence dans le couplage à travers le ferrite) de l'ordre de 2 à 4 dB dans leur bande de fréquence de fonctionnement, qui par ailleurs est étroite, de l'ordre de 0.2 à 1 GigaHertz.

[0010] Pour toutes ces différentes raisons, on cherche à remplacer les circulateurs ferromagnétiques par des composants qui ne présentent pas ces différents inconvénients.

[0011] L'invention propose une solution alternative permettant de simplifier la réalisation des circulateurs, de réduire leur coût de fabrication, et la surface occupée, de réduire la puissance électrique dissipée.

[0012] Une idée à la base de l'invention est d'utiliser des micro-dispositifs électromécaniques appelé MEMS (suivant l'acronyme anglo-saxon pour Micro Electro Mechanical System), et plus particulièrement des micro-dispositifs de type condensateur, fonctionnant comme des commutateurs, micro-dispositifs que l'on appelle micro-commutateurs dans la suite.

[0013] Les micro-commutateurs de type condensateur sont particulièrement appréciés dans les applications hyperfréquence, notamment pour leurs faibles temps de réponse alliés à des tensions de commande peu élevées allant de quelques volts à quelques dizaines de volts. Ils sont avantageusement très petits, de taille millimétrique (2 à 10 mm²), soit en moyenne 10 fois plus petits qu'un circulateur ferromagnétique. Ils consomment très peu. Ils sont peu coûteux à produire car ils utilisent les techniques de fabrication usuelles en microélectronique, depuis un substrat généralement silicium et sont très facilement reproductibles. Leurs pertes par insertion sont très faibles, généralement de l'ordre de 0.1 à 0.2 dB sur une très large bande de fréquence, 18 à 19 GigaHertz.

[0014] On s'intéresse plus particulièrement aux micro-commutateurs de type série : une ligne de signal d'entrée et une ligne de signal de sortie dans le prolongement l'une de l'autre, séparées par une zone de commutation,

et isolées électriquement, et au-dessus de la zone de commutation, une membrane flexible, reposant sur des piliers. La zone de commutation est recouverte d'un diélectrique. La membrane est soit en position de repos, haute, la capacité formée par la zone de commutation, le diélectrique et la membrane ayant une valeur Coff faible, de sorte que les deux lignes de signal sont isolées, soit en position basse en sorte que les deux portions de ligne sont couplées de façon capacitive, la capacité formée par la zone de commutation, le diélectrique et la membrane ayant une valeur Con élevée, permettant la transmission d'un signal radiofréquence ou hyperfréquence. La commande de la membrane est une commande en tension appliquée de manière appropriée dans la zone de commutation, la membrane étant portée à un potentiel de référence (masse électrique) par les piliers. Les performances de commutation (transmission, isolation) dépendent notamment du rapport Con sur Coff qui doit être le plus élevé possible.

[0015] Une idée à la base de l'invention est de tirer avantage de toutes les qualités d'un tel composant micro-commutateur de type série pour réaliser un circulateur adapté à des systèmes de télécommunication radiofréquence.

[0016] L'invention concerne donc un circulateur avec au moins trois ports, un premier port d'entrée pour recevoir un signal radiofréquence ou hyperfréquence à transmettre vers un deuxième port destiné à être connecté à une antenne d'émission/ réception, un troisième port de sortie apte à être connecté à un dispositif récepteur d'un signal radiofréquence ou hyperfréquence. Le système est caractérisé en ce qu'il comprend deux micro-commutateurs électromécaniques identiques de type série selon l'invention, formés sur un même substrat, un premier micro-commutateur étant disposé pour permettre la transmission d'un signal radiofréquence ou hyperfréquence depuis ledit port d'entrée vers le port destiné à être connecté à une antenne, un deuxième micro-commutateur étant disposé pour permettre la transmission de signal entre ledit deuxième port vers ledit port de sortie, et en ce qu'il est associé à un circuit d'adaptation d'impédance connecté entre le deuxième port et l'antenne, ledit circuit ayant pour fonction d'agir comme un obstacle virtuel à la transmission d'un signal radiofréquence ou hyperfréquence depuis ledit deuxième port vers le premier port.

[0017] La structure des micro-commutateurs d'un tel circulateur doit être très bien adaptée en impédance pour que la transmission de puissance radiofréquence soit significative. Notamment, on recherche une structure ou topologie de micro-commutateur qui soit apte à supporter la puissance radiofréquence élevée à transmettre vers l'antenne (en émission), avec de bonnes propriétés de transmission et d'isolation radiofréquence et hyperfréquence, de faibles pertes par insertion, une faible latence (temps caractéristiques de commutation à l'état bloqué et à l'état passant), et en conservant de faibles niveaux de tension de commande de l'ordre de quelques volts à quelques dizaines de volts.

[0018] Il faut une topologie qui permette d'augmenter la capacité radiofréquence à l'état on du commutateur, d'offrir une capacité faible à l'état non passant (off) et invariante avec la fréquence afin d'optimiser ses performances électromécaniques et de garantir une durée de vie du micro-commutateur en termes de nombre de commutations au moins égale à 10^{11} .

[0019] Selon l'invention chaque micro-commutateur du circulateur est formé sur un substrat de base recouvert d'une couche de passivation, et est caractérisé en ce qu'il comprend :

- une membrane métallique mobile formant pont au-dessus d'une zone de commutation entre une première ligne de signal et une deuxième ligne de signal isolées entre elles. Les première et deuxième lignes de signal sont disposées dans le prolongement l'une de l'autre et ladite membrane comprend au moins couche d'un matériau métallique sélectionné parmi Al, Au ou Cu,
- une électrode de commande en tension réalisée dans un matériau conducteur résistif sur la couche de passivation, dans ladite zone de commutation, et comprenant deux parties électriquement isolées, l'une en contact avec la première ligne signal et l'autre en contact avec la deuxième ligne signal,
- un diélectrique de permittivité relative supérieure à la centaine et invariante avec la fréquence, disposé sur ladite électrode de commande, et ayant une forme telle que suivant la direction des deux lignes signal, ladite électrode de commande est plus large des deux côtés, et suivant la direction orthogonale, le matériau diélectrique déborde des deux côtés de ladite électrode de commande, et vient en contact sur ladite couche de passivation.

[0020] Plus précisément, le circulateur a au moins trois ports, un port d'entrée pour recevoir un signal radiofréquence à transmettre vers un port destiné à être connecté à une antenne d'émission/ réception, un port de sortie apte à être connecté à un dispositif récepteur ou une charge. Il comprend deux micro-commutateurs électromécaniques de type série identiques formés sur un même substrat. Un premier micro-commutateur est disposé pour permettre la transmission d'un signal radiofréquence ou hyperfréquence depuis ledit port d'entrée correspondant à la première ligne de signal dudit premier micro-commutateur vers le port destiné à être connecté à une antenne, correspondant à la deuxième ligne de signal dudit premier micro-commutateur, un deuxième micro-commutateur est disposé pour permettre la transmission de signal entre le port destiné à être connecté à une antenne, correspondant à la première ligne de signal dudit deuxième micro-commutateur vers ledit port de sortie correspondant à la deuxième ligne de signal dudit deuxième micro-commutateur.

[0021] Selon un aspect de l'invention, le circulateur comprend au moins un premier et un deuxième plots de

contact pour appliquer des tensions de commande à l'état on ou off sur au moins une des parties de l'électrode de commande du premier micro-commutateur et du deuxième micro-commutateur. Les tensions d'activation sont de l'ordre du volt à quelques dizaines de volts. Les micro-commutateurs peuvent être commandés simultanément à l'état off, ou l'un à l'état on et l'autre à l'état off.

[0022] La membrane repose à au moins une extrémité sur un pilier conducteur, ledit pilier conducteur et les lignes de signal étant réalisés sur ladite couche de passivation.

[0023] Dans un mode de réalisation, le circulateur comprend deux lignes de masse coplanaires parallèles, disposées symétriquement par rapport aux dites première et deuxième lignes signal, lesdites lignes de masse étant séparées desdites lignes de signal par une couche d'isolant réalisée dans un matériau différent de celui de la première couche de passivation du substrat.

[0024] Le circuit d'adaptation d'impédance est avantageusement formé par deux micro-commutateurs de type série réalisés sur un même substrat, utilisés en capacités variables, chacun disposé entre deux tronçons d'une ligne de signal qui est destinée à être connectée à une extrémité au port du circulateur destiné à recevoir l'antenne, et à une autre extrémité, à être reliée à l'antenne, la capacité de chaque micro-commutateur étant définie par la tension appliquée sur une électrode de commande respective et les caractéristiques géométriques de la membrane, l'inductance de chaque cellule étant définie par les dimensions géométriques d'un tronçon de ligne de signal correspondant.

[0025] L'invention concerne aussi un système de télécommunication radiofréquence comprenant une antenne d'émission réception, un circuit d'émission à amplificateur, un circuit de réception à amplificateur et un premier circulateur selon l'invention avec un premier port connecté à la sortie du circuit d'émission, un deuxième port connecté à l'antenne, un troisième port connecté au circuit de réception.

[0026] US2004/0127178 concerne un duplexeur accordable à filtres RF, à commutateurs SPST permettant 3 modes de fonctionnement (réception seulement, et à capacités MEMS variables pour réaliser des filtres accordables.

[0027] US6580337 propose une structure de commutateur SPDT à MEMS offrant une meilleure isolation RF.

[0028] D'autres avantages et caractéristiques de l'invention sont détaillés dans la description suivante en référence aux dessins illustrés d'un mode de réalisation de l'invention, donné à titre d'exemple non limitatif. Dans ces dessins :

- les figures 1 a et 1 b illustrent deux modes de transmission de signal dans un circulateur;
- la figure 2 est un schéma simplifié d'un système de télécommunication sans fil comprenant un circulateur selon l'état de l'art;
- la figure 3 illustre schématiquement en vue de des-

sus un circulateur à micro-commutateurs selon l'invention ;

- les figures 4a à 4c illustrent en vue de dessus et en coupe la structure d'un micro-commutateur série selon l'invention, spécialement adapté pour un circulateur selon l'invention;
- les figures 5a et 5b sont illustrent les modes de transmission de signal radiofréquence dans le circulateur selon l'invention, avec des tensions d'activation correspondantes indiquées à titre d'exemple;
- les figures 6 et 7 illustrent un circuit d'adaptation à condensateurs selon l'invention;
- la figure 8 est un schéma simplifié d'un circuit d'adaptation dynamique d'impédance à micro-commutateurs selon l'invention,
- la figure 9 est un schéma simplifié d'un système de télécommunication sans fil selon l'invention ;
- les figures 10a et 10b à 16a et 16b, 17, 18a, 18b et 19 illustrent des phases topologiques d'un procédé de fabrication d'un micro-commutateur tel qu'illustré sur les figures 4a à 4c.

[0029] Un circulateur CMEMS selon l'invention est décrit en référence aux figures 3 à 9. Comme illustré sur la figure 3, le circulateur CMEMS comprend deux micro-commutateurs de type série, identiques. Un premier micro-commutateur MEMS1 est disposé pour permettre la transmission d'un signal radiofréquence ou hyperfréquence depuis un port d'entrée p1 par une ligne de signal Ls1 vers un port p2 destiné à être connecté à une antenne, par une deuxième ligne de signal Ls2. Un deuxième micro-commutateur MEMS2 est disposé pour permettre la transmission de signal depuis le deuxième port p2, par la ligne de signal Ls2 vers un port de sortie p3, par une troisième ligne de signal Ls3.

[0030] L'ensemble du circulateur, avec notamment les micro-commutateurs et les lignes signal, est réalisé sur un même substrat de base.

[0031] Chaque micro-commutateur de type série comprend de manière générale un ensemble membrane - matériau diélectrique - électrode de commande qui forme un condensateur variable dont la membrane et l'électrode constituent les armatures. L'électrode de commande est disposée dans une zone de commutation entre les deux lignes de signal associées au micro-commutateur et a une forme en deux parties, isolées, de préférence interdigitées, chaque partie contactant une ligne signal. Elle est recouverte d'un diélectrique. La membrane est disposée au-dessus de la zone de commutation. Le diélectrique est choisi pour présenter une permittivité relative élevée, supérieure à la centaine. C'est de préférence du PZT, dont la permittivité relative, déterminée lors de la fabrication du PZT pour être égale à 150 dans le cas qui nous intéresse, est avantageusement invariante avec la fréquence.

[0032] Un condensateur est ainsi constitué dont les armatures sont d'une part la membrane et d'autre part l'électrode de commande en regard. La capacité du con-

densateur ainsi formée varie entre une valeur Coff faible correspondant à un état off, ouvert du micro-commutateur et une valeur Con élevée correspondant à un état on, fermé du micro-commutateur. Lorsque l'électrode de commande ne génère pas de tension sous la membrane, celle-ci est au repos, en position haute. La capacité Coff du condensateur est faible de l'ordre d'une dizaine de femtofarads. Cette capacité très faible induit une impédance suffisamment importante entre les deux lignes conductrices pour qu'aucun signal ne puisse passer d'une ligne à l'autre. Le micro-commutateur est ouvert.

[0033] Lorsque l'on soumet l'ensemble membrane - électrode à une tension d'activation, de l'ordre par exemple de 32 volts, la membrane est soumise à une force électrostatique qui la déforme jusqu'à venir en contact avec le diélectrique sur l'électrode de commande. La capacité Con du condensateur augmente environ d'un rapport cent. Cette capacité Con de l'ordre du picofarad induit une impédance suffisamment faible entre les deux lignes de signal pour qu'un signal radiofréquence ou hyperfréquence puisse passer entre les deux lignes. Le micro-commutateur est fermé.

[0034] Avantageusement, la structure de chaque micro-commutateur MEMS1, MEMS2 d'un circulateur CMEMS selon l'invention est comme illustrée sur les figures 4a, 4b et 4c, respectivement en vue de dessus, en coupe suivant AA, et suivant BB.

[0035] Cette structure est réalisée par superposition de couches sur un substrat de base 1, typiquement un substrat silicium hautement résistif, recouvert d'une couche de passivation 2, typiquement de l'oxyde de silicium SiO₂.

[0036] Elle comprend deux lignes de signal LS-IN et LS-OUT réalisées sur la couche de passivation 2, disposées coplanaires dans le prolongement l'une de l'autre, séparées par une zone de commutation 10. Dans la zone de commutation, une électrode de commande 3 est réalisée entre les deux lignes signal, en deux parties isolées électriquement : chaque partie contacte une ligne signal. Un diélectrique 4 à forte permittivité relative supérieure à la centaine et invariante avec la fréquence est déposé sur l'électrode de commande 3. Il a une forme telle que dans la direction suivant les lignes signal, l'électrode de commande est plus large des deux côtés, et dans la direction orthogonale, il débord de chaque côté de l'électrode de commande 3, sur la couche de passivation 2.

[0037] Le diélectrique 4 doit permettre de répondre aux contraintes de fortes puissance radiofréquence ou hyperfréquence : en transmission à l'état on, passant (membrane en position infléchi vers le bas, au contact du diélectrique), et en isolation à l'état off ou ouvert (membrane en position haute initiale).

[0038] Le diélectrique 4 est de préférence du PZT, qui combine les avantages d'avoir une forte permittivité relative supérieure à la centaine invariante avec la fréquence, de pouvoir travailler en hyperfréquence, jusqu'à 100 GigaHertz, et de supporter la puissance, du fait de sa nature monocristalline. De préférence on utilise un PZT

avec une permittivité relative égale à 150, déterminée lors de sa fabrication.

[0039] En pratique, le gap séparant les deux parties de l'électrode de commande à une largeur g de l'ordre de 10 microns. La coupure entre les deux parties peut être à section droite. Elle est avantageusement telle que les deux parties sont interdigitées. De manière connue, une telle forme permet d'augmenter significativement la capacité diélectrique du condensateur formé par la membrane m, l'électrode de commande 3 et le diélectrique 4.

[0040] De préférence, l'électrode de commande est réalisée dans un alliage Platine/Or et ce pour des besoins technologiques.

[0041] La membrane m repose à chaque extrémité, sur un pilier conducteur 5a, 5b. Il est aussi possible de n'envisager qu'un seul pilier conducteur sur les deux qui soutiennent la membrane.

[0042] Dans l'exemple, la structure de micro-commutateur est de type coplanaire : des lignes de masse LM1 et LM2 sont réalisées sur la même face du substrat que les lignes de signal LS-IN et LS-OUT. Ces lignes de masse coplanaires sont réalisées sur un niveau topologique séparé du niveau des lignes de signal d'entrée/sortie par une couche d'isolant 6, dans un matériau différent de celui utilisé pour la couche de passivation. Cet isolant est typiquement du nitrure de silicium. De cette façon, on est certain qu'il ne se produira pas de court-circuit entre une ligne de signal et une ligne de masse, via le substrat. Cela a pour effet technique que la structure de micro-commutateur selon l'invention peut monter très haut en fréquence, typiquement jusqu'à au moins 100 GigaHertz.

[0043] On notera que si on considère une technologie microstrip (non illustrée), selon laquelle le plan de masse est réalisé sur la face arrière d'un substrat adapté à cette technologie, la couche d'isolant 6 n'a plus de raison d'être.

[0044] Les piliers, les lignes de signal et les lignes de masse comprennent typiquement une première couche d'accroche, résistive, représentée en noir épais sur les figures 4b et 4c et une deuxième couche peu résistive, typiquement de l'or. La première couche est suffisamment résistive pour empêcher la propagation d'un signal radiofréquence ou hyperfréquence. C'est typiquement une couche de Titane tungstène, de préférence à 80% de Titane et 20% de tungstène à 1 ou 2% près, par laquelle les meilleures performances radiofréquences et hyperfréquences sont obtenues.

[0045] La couche de titane-tungstène 7 des lignes de signal et des piliers sert aussi à la réalisation de lignes de connexion par lesquelles, une tension d'activation du micro-commutateur peut être appliquée dans la zone de commutation. En pratique, au moins un plot de contact (non illustré sur les figures 4a à 4c) est réalisé de la même façon que la ligne de signal et les piliers, sur les mêmes niveaux topologiques et une ligne de connexion est réalisée entre ce plot et au moins une ligne signal. De préférence le plot de contact est relié aux deux lignes de

signal LS-IN et LS-OUT, en sorte que la tension se retrouve sur les deux parties de l'électrode de commande 3. La disposition en doigts interdigités permet d'avoir une partie métallique sensiblement au milieu sous la membrane. Ces deux caractéristiques combinées permettent d'obtenir un champ électrostatique maximum sensiblement au milieu de la membrane, ce qui assure des temps de commutation on et off optimum.

[0046] La membrane métallique comprend :

- une couche d'accroche, résistive, typiquement en titane-tungstène, faisant face à la zone de commutation. Cette couche est suffisamment résistive pour empêcher la propagation d'un signal radiofréquence ou hyperfréquence. Le titane tungstène a de préférence une proportion de 80 % de titane et 20% de tungstène à 1 ou 2 % près, comme indiqué précédemment.
- une couche très conductrice, dans un matériau sélectionné parmi, Al, Cu et Au. Ces matériaux métalliques sont sélectionnés pour leur faible résistivité électrique et leur capacité à résister à un stress mécanique supérieur à 30 mégapascals : la membrane doit pouvoir se déformer pour venir en contact du diélectrique 4 sans se casser (état on), et revenir dans son état initial (état off). De préférence, c'est l'aluminium qui est utilisé, par lequel les meilleurs résultats sont obtenus en terme de rapidité de commutation et résistance au stress mécanique.

[0047] Dans un mode de réalisation préféré d'un micro-commutateur, on choisit les caractéristiques de dimensionnement suivantes :

La section des lignes de signal a une largeur l_s de 80 microns, et la distance d séparant de chaque côté la ligne de signal de la ligne de masse est de 120 microns.

[0048] La couche d'or e9 des lignes signal et des piliers a une épaisseur de l'ordre de 3 microns. L'électrode de commande a une épaisseur de l'ordre de 0,7 microns. L'épaisseur des lignes de masse n'est pas un paramètre important. La couche 4 de PZT a une épaisseur e_4 inférieure au micron, par exemple 0,4 micron. L'épaisseur des lignes de masse découle du procédé technologique utilisé.

[0049] La partie mobile de la membrane, c'est à dire hors piliers, s'inscrit dans une forme de parallépipède rectangle, dont les dimensions sont avantageusement : une largeur l_m de 100 microns, suivant la direction des lignes signal, et une longueur w_m entre les deux piliers, de l'ordre de 280 microns. L'épaisseur totale e_m de la membrane est de l'ordre de 0,7 microns, la première couche de titane tungstène étant d'épaisseur inférieure à la deuxième couche. Dans un exemple la couche de titane tungstène a une épaisseur de 0.2 microns. Le diélectrique PZT déborde sur longueur de l'ordre de 20 microns

sur la couche de passivation, de chaque côté.

[0050] Le micro-commutateur qui vient d'être décrit a de bonnes performances radiofréquences et hyperfréquences notamment pour la transmission de signaux de puissance radiofréquence ou hyperfréquence significative, de l'ordre de la dizaine de watts.

[0051] Un exemple d'un procédé de fabrication d'un tel micro-commutateur est donné à la fin de la présente description, en référence aux figures 10a et suivantes, pour une technologie coplanaire.

[0052] En pratique la commande en tension de la commutation des micro-commutateurs selon que l'on travaille en émission ou en réception est assurée par un circuit électronique de fonctionnement comparable à celui circulateurs ferromagnétiques, à la différence des niveaux de tension à appliquer, qui sont plus faibles. La figure 5a est un schéma électrique simplifié du circulateur, dans un état correspondant à la transmission d'un signal radiofréquence depuis le port p1 (entrée RF) vers le port p2 (Antenne). Le micro-commutateur MEMS1 doit alors être commandé à l'état fermé (Con), et le micro-commutateur MEMS2 doit alors être commandé à l'état ouvert (Coff). Ceci est obtenu comme illustré sur la figure 5a, en appliquant sur chaque micro-commutateur une tension de référence (masse électrique) sur la membrane m et une tension d'activation appropriée sur l'électrode de commande ec. Dans un exemple, on a ainsi les tensions $V_{m1} = 0$ volt (masse électrique), $V_{c1} = 32$ volts (tension d'activation à l'état on) appliquées respectivement sur la membrane m et sur l'électrode de commande ec du premier micro-commutateur MEMS1 commandé à l'état on. La membrane m du deuxième micro-commutateur MEMS2 est isolée (aucune tension appliquée) et la tension V_{c2} appliquée sur l'électrode de commande ec est égale à 0 volts.

[0053] Pour la transmission d'un signal radiofréquence depuis le port p2 (Antenne) vers le port p3 (sortie RF), c'est l'inverse, comme illustré sur la figure 5b : le micro-commutateur MEMS1 doit alors être commandé à l'état ouvert (Coff), et le micro-commutateur MEMS2 doit alors être commandé à l'état fermé (Con).

[0054] Un circulateur selon l'invention présente d'excellentes performances, notamment en termes de pertes par insertion, de l'ordre du dixième de dB à quelques dixièmes de dB, et un gain d'espace très significatif, avec un composant dix fois plus petit que les circulateurs ferromagnétiques et une bande de fréquence de fonctionnement plus large, sur 18 à 19 GigaHertz environ.

[0055] Le circulateur qui vient d'être décrit en relation avec la figure 4 est un composant passif. C'est typiquement un composant SPDT (Single pole, Double Throw), qui présente l'inconvénient d'autoriser le passage du signal radiofréquence dans les deux sens : la transmission de signal entre les ports p1 et p2 et entre les ports p2 et p3 peut potentiellement fonctionner dans les deux sens, les micro-commutateurs ne voyant pas la différence. Typiquement, avec un tel circulateur passif, une partie de la puissance radiofréquence captée par l'antenne, peut

être réfléchi vers le port émetteur p1.

[0056] Selon l'invention, et comme illustré sur la figure 6, on prévoit avantageusement un circuit ADAPT d'adaptation d'impédance à deux cellules de type LC, notée LC_1 et LC_2 . Il est connecté entre l'antenne A et le port p2 auquel l'antenne A doit être reliée. Un tel circuit d'adaptation d'impédance agit comme un obstacle virtuel vis à vis du port d'entrée p1, qui voit alors une impédance infinie.

[0057] On se réfère à la figure 7. On note Z_{rc} l'impédance ramenée par l'antenne, à la sortie p2 du circulateur du système. On note Z_{rs} l'impédance ramenée du circulateur à l'entrée de l'antenne.

[0058] Une première cellule LC_1 , comprenant une inductance L_1 et un condensateur C_1 et une deuxième cellule LC_2 comprenant une inductance L_2 et un condensateur C_2 sont connectées en série entre la sortie p2 du circulateur et l'antenne A : les inductances L_1 et L_2 sont connectées en série entre p2 et A. Le condensateur C_1 est connecté entre le point milieu entre les deux inductances, et la masse. Le condensateur C_2 est connecté entre le point de connexion entre l'inductance L_2 et l'antenne A et à la masse.

[0059] Pour ne pas avoir de réflexion à la sortie p2 du circulateur, on cherche à ce que Z_{rc} soit égale à 50 Ohms et à ce que Z_{rs} l'impédance ramenée du système à l'entrée de l'antenne soit égale à une valeur Z qui est une caractéristique de l'antenne. Le circuit ADAPT est ainsi un filtre à deux pôles.

[0060] Grâce à un choix judicieux des inductances L_1 et L_2 ainsi qu'à celui des capacités C_1 et C_2 , selon les techniques de l'art, on réalise une adaptation sur une bande de fréquence correspondant à la bande d'émission et de réception de l'antenne.

[0061] Dans un premier mode de réalisation de l'invention (figure 6), ce circuit d'adaptation d'impédance est un filtre passif : les éléments des cellules LC_1 et LC_2 sont pré-configurés (ou dimensionnés) pour une application donnée, c'est à dire pour une antenne donnée : fréquence, impédance d'antenne.

[0062] Un mode de réalisation préféré d'un tel circuit d'adaptation d'impédance est basé sur des micro-commutateurs comparables à ceux utilisés pour le circulateur, à la différence que la membrane est formée d'une unique couche épaisse d'aluminium, en sorte de former une structure rigide, dont on peut contrôler le déplacement par paliers, suivant l'amplitude de la tension d'activation appliquée sur la tension de commande. Cette tension définit alors le déplacement de la membrane rigide, compris entre la position de repos et une position maximum, prédéfinie. De préférence, la membrane a une épaisseur de l'ordre de 2,5 microns. Notamment, les micro-commutateurs ont la même structure que celle décrite en relation avec les figures 4a à 4c, à l'exception de la structure de la membrane comme indiqué plus haut.

[0063] Les inductances sont alors réalisées par les portions de ligne de signal entre les micro-commutateurs, comme illustré sur la figure 7. Les paramètres d'induc-

tance et de capacité de chaque cellule sont définis par la géométrie des membranes (largeur lc_1 , lc_2 , longueur wc_1 , wc_2) et des lignes de signal L_1 et L_2 : largeur lL_1 , lL_2 , et longueur wL_1 , wL_2 et par les tensions d'activation appliquées aux électrodes de commande. Ces tensions d'activation définissent la hauteur du déplacement de la membrane et par suite la valeur de la capacité.

[0064] Comme illustré sur la figure 6, la valeur de la capacité est alors définie, pour des dimensions prédéterminées, par la valeur de la tension d'activation appliquée sur chaque électrode de commande : V1 pour le premier condensateur C1 et V2 pour le deuxième condensateur C2. Ce sont les tensions qui déterminent la position de la membrane dans chaque micro-système, en mode de fonctionnement, pour une application donnée.

[0065] Sur la figure 7, la représentation qui est donnée correspond à une structure de circuit de type microstrip : le substrat adapté à cette technologie est muni en face arrière d'un plan de masse.

[0066] L'homme du métier sait réaliser de façon similaire un tel circuit en technologie coplanaire : on réalise alors des lignes de masse coplanaires disposées de façon symétrique de part et d'autre des lignes signal, en détournant la forme des lignes de signal et des membranes en sorte d'être distant de partout d'une valeur de brèche déterminée, typiquement 80 microns.

[0067] Selon un perfectionnement de l'invention, le circuit d'adaptation d'impédance est actif, permettant une adaptation dynamique d'impédance. Il comprend des capacités variables qui permettent d'adapter ses caractéristiques de filtrage de façon dynamique avec la variation d'impédance vue en sortie. On a alors un dispositif particulièrement adapté pour une utilisation avec des antennes dites actives ou avec des réseaux d'antennes reconfigurables utilisés dans certains systèmes, par exemple dans des systèmes radars.

[0068] Un mode de réalisation préféré d'un tel circuit d'adaptation dynamique d'impédance reprend la réalisation décrite en référence avec la figure 6, avec une différence pour la tension d'activation des électrodes de commande. Ce mode de réalisation est illustré sur la figure 8. On utilise en effet un autre micro-commutateur en capacité variable C3, pour commander la tension V_{adapt} appliquée sur les électrodes de commande des capacités variables C1 et C2, l'électrode de commande ec3 de cette capacité variable C3 étant connectée au plot de contact PA destiné à être connecté à l'antenne A. En effet, le courant ou la tension en ce point est fonction de l'impédance réelle de l'antenne. On obtient ainsi de façon très avantageuse, un circuit d'adaptation d'impédance auto-adaptatif à la variation d'impédance ramenée par l'antenne, qui intéresse particulièrement les systèmes à antenne active ou en réseaux. Il peut être réalisé en technologie microstrip ou coplanaire.

[0069] Les éléments des cellules LC sont alors dimensionnés (inductance, capacité) pour répondre à une bande de fréquence donnée, correspondant à une bande de fréquence, la commande en tension selon l'invention per-

mettant l'auto-adaptation dynamique en mode opérationnel.

[0070] De préférence, le circuit d'adaptation d'impédance ADAPT est réalisé de façon séparée du circulateur. On peut ainsi adapter le circuit et le circulateur en fonction du système de télécommunication considéré et des caractéristiques de l'antenne.

[0071] La figure 9 illustre la configuration d'un système de télécommunication qui peut être réalisé selon l'invention, avec un isolateur IMEMS, un circulateur CMEMS et un circuit d'adaptation d'impédance ADAPT connecté entre le port p2 et une antenne A. L'isolateur IMEMS est placé entre l'émetteur E, sur son port d'entrée p1 et le port d'entrée du circulateur, relié à son port p2, avec une charge de 50 ohms connectée au port p3.

[0072] Un procédé de fabrication d'un micro-commutateur avantageusement utilisé dans l'invention, tel que décrit en relation avec les figures 3a à 3c, va maintenant être décrit. Il est illustré par les figures 10 a et suivantes, qui en montrent différentes étapes 1 à 10 caractéristiques.

[0073] Etape 1, figures 10a (vue de dessus) et 10b (coupe suivant X). Sur un substrat 100, par exemple du silicium hautement résistif, on réalise une couche de passivation 101 en oxyde de silicium SiO_2 (permittivité relative 4). On réalise l'électrode de commande 102, avec sa forme en deux parties isolées a, b, de préférence comme illustré, interdigitées. La largeur g du gap entre les deux parties est typiquement 10 microns. L'électrode de commande est par exemple réalisée dans un alliage Titane/Platine surmontée d'une couche Or/Platine.

[0074] Etape 2, figures 11 a et 11 b. Le diélectrique PZT 103 est formé sur l'électrode de commande suivant la forme prescrite, typiquement par un procédé de type sol-gel ou par pulvérisation cathodique : plus étroite suivant la direction Ds des lignes de signal et plus large des deux côtés suivant la direction orthogonale, venant reposer sur la couche 101 de passivation.

[0075] Etape 3, figures 12a (vue de dessus) et 12b (coupe suivant YY'). Formation des lignes de signal LS-IN et LS-OUT, des plots de contact Pc, et des piliers PI, par dépôt d'une couche de Titane/tungstène 104, dépôt et gravure d'une couche d'or 105. La couche en surface est alors la couche 104.

[0076] Etape 4, figures 13a et 13b : gravure de la couche 104 de titane/tungstène, pour former des lignes de connexion, entre un plot de contact et une ou les deux lignes de signal (pour amener une tension d'activation sur une ou les deux parties de l'électrode de commande), et un plot de contact et un pilier pour mettre la membrane à une référence de tension (masse électrique). On retrouve comme couche de surface, en dehors des éléments réalisés, la couche de passivation 101.

[0077] Etape 5, Figures 14a et 14b. Dépôt de la couche d'isolant en nitrure de silicium Si_3N_4 , puis ouverture O sur les lignes signal, et les plots de contact, les piliers et le diélectrique 103, suivant les pointillés. La couche de surface est cette couche 106 d'isolant.

[0078] Etape 6, Figures 15a et 15b. Dépôt d'une couche 107 de Titane/tungstène et dépôt et gravure d'une couche d'or 109, pour former les lignes de masse LM1 et LM2. La couche de surface est la couche 107 de Titane/tungstène.

[0079] Etape 7, figures 16a et 16b. Retrait localisé de Titane tungstène dans une zone f sous l'emplacement de la membrane.

[0080] Etape 8, figure 17. Recharge localisée d'or, par dépôt préalable de résine sur toute la surface et par injection de courant via les plots de contact et les lignes de connexion. La hauteur d'or ainsi obtenue est contrôlée par l'épaisseur de résine. En pratique l'épaisseur (ou la hauteur) d'or des lignes de signal et des piliers atteint 3 microns. La résine permet d'atteindre le même niveau partout, ce qui assure la planéité de la membrane qui est réalisée à l'étape suivante.

[0081] Etape 9, Figures 18a et 18b. Formation de la membrane. Pour un micro-commutateur utilisé en interrupteur comme dans le circulateur et comme décrite en relation avec les figures 3a à 3c, dépôt de titane tungstène puis dépôt d'Aluminium (ou Or, ou Cuivre), et gravure de la membrane. De préférence on a une épaisseur de titane tungstène de 0,2 microns et une épaisseur d'Or de 0,5 microns. Pour un micro-commutateur utilisé comme condensateur variable comme dans le circuit d'adaptation d'impédance, Dépôt d'une seule couche, en aluminium, avec une épaisseur de l'ordre de 2,5 microns et gravure.

[0082] Etape 10, figure 19 : libération de la membrane par élimination de la couche de résine de l'étape 8, par exemple par solvants. Cette opération est facilitée par une membrane qui est percée de trous. Une telle structure de membrane a en outre pour effet de rendre la membrane moins rigide, ce qui contribue à améliorer la latence et offre de meilleures performances radio et hyperfréquences.

Revendications

1. Circulateur à au moins trois ports (p1, p2, p3), un port d'entrée (p1) pour recevoir un signal radiofréquence à transmettre vers un port (p2) destiné à être connecté à une antenne d'émission/ réception (A), un port de sortie (p3) apte à être connecté à un dispositif récepteur ou une charge, **caractérisé en ce qu'il** comprend un premier et un deuxième micro-commutateurs électromécaniques de type série identiques (MEMS1, MEMS2) formés sur un même substrat (1) de base recouvert d'une couche de passivation (2) ayant chacun :

- une membrane métallique mobile (m) formant pont au-dessus d'une zone de commutation (10) entre une première ligne de signal (LS-IN) et une deuxième ligne de signal (LS-OUT) isolée de la première ligne, les première et deuxième

lignes de signal disposées dans le prolongement l'une de l'autre, ladite membrane (m) comprenant au moins une couche d'un matériau métallique sélectionné parmi Al, Au ou Cu,

- une électrode de commande en tension (3) réalisée sur la couche de passivation, dans ladite zone de commutation, et comprenant deux parties électriquement isolées,

- un matériau diélectrique (4) de permittivité relative élevée supérieure à une centaine, et invariante avec la fréquence, disposé en contact direct par-dessus ladite électrode de commande (3), et ayant une forme telle que suivant la direction des deux lignes signal, ladite électrode de commande est plus large des deux côtés, et suivant la direction orthogonale, le matériau diélectrique débordé des deux côtés de ladite électrode de commande, et vient en contact sur ladite couche de passivation (2), et

- le premier micro-commutateur est disposé pour permettre la transmission d'un signal radiofréquence ou hyperfréquence depuis ledit port d'entrée (p1) correspondant à la première ligne de signal (Ls1) du premier micro-commutateur vers le port (p2) destiné à être connecté à une antenne, correspondant à la deuxième ligne de signal (Ls2) du premier micro-commutateur,

- le deuxième micro-commutateur est disposé pour permettre la transmission de signal entre le port (p2) destiné à être connecté à une antenne, correspondant à la première ligne de signal (Ls2) du deuxième micro-commutateur vers ledit port de sortie (p3) correspondant à la deuxième ligne de signal (Ls3) du deuxième micro-commutateur,

et en ce qu'il comprend un circuit d'adaptation d'impédance (ADAPT) connecté sur ledit port (p2) destiné à être relié à une antenne (A), ledit circuit d'adaptation ayant une fonction d'obstacle virtuel à la transmission ou la réflexion d'un signal depuis ledit port (p2) vers le port d'entrée (p1).

2. Circulateur selon la revendication 1, **caractérisé en ce qu'il** comprend au moins un premier et un deuxième plots de contact pour appliquer des tensions de commande à l'état on ou off sur au moins une des parties de l'électrode de commande du premier micro-commutateur et du deuxième micro-commutateur, les dites tensions de commande étant de l'ordre du volt à quelques dizaines de volts et lesdits micro-commutateurs pouvant être commandés simultanément à l'état off, ou l'un à l'état on et l'autre à l'état off.
3. Circulateur selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** dans chaque micro-commutateur, la membrane métallique mobile (m) repose à au moins

une extrémité sur un pilier conducteur (5a, 5b), et le pilier conducteur et les lignes de signal (LS-IN, LS-OUT) sont réalisés sur la couche de passivation (2).

4. Circulateur selon la revendication 2 ou 3, **caractérisé en ce que** chaque microcommutateur comprend deux lignes de masse coplanaires parallèles (LM1, LM2), disposées symétriquement par rapport aux dites première et deuxième lignes signal, lesdites lignes de masse étant séparées desdites lignes de signal par une couche d'isolant (6) réalisée dans un matériau différent de celui de la première couche de passivation du substrat.
5. Circulateur selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** ladite électrode de commande des micro-commutateurs est un alliage Platine/Or.
6. Circulateur selon l'une des revendications 2 ou 3, **caractérisé en ce que** les lignes signal, les piliers et les plots de contact des micro-commutateurs comprennent une première couche conductrice résistive, en titane tungstène, avec une proportion 80/20 à 1 ou 2 % près.
7. Circulateur selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** dans chacun des deux micro-commutateurs, la zone de gap (g) entre les deux parties de l'électrode de commande a une longueur de dix micromètres.
8. Circulateur selon l'une des revendications 1 à 7 précédentes, **caractérisé en ce que** dans chacun des deux micro-commutateurs, la membrane métallique mobile (m) comprend une couche inférieure, face à l'électrode de commande, en titane tungstène, avec une proportion 80/20 et une épaisseur inférieure à celle de ladite couche d'un matériau métallique sélectionné parmi Al, Au ou Cu.
9. Circulateur selon la revendication 1, dans lequel pour chacun des deux micro-commutateurs, la couche de matériau métallique sélectionné parmi Al, Au ou Cu de la membrane a une épaisseur de l'ordre de 0,5 microns, et la membrane a une épaisseur totale de l'ordre de 0,7 microns.
10. Circulateur selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** ledit circuit d'adaptation d'impédance (ADAPT) comprend une première et une deuxième cellules de type LC, les éléments desdites cellules étant calculés en fonction de caractéristiques de l'antenne (A).
11. Circulateur selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** ledit circuit d'adaptation d'impédance (ADAPT) est formé par deux micro-commutateurs de type série réalisés sur un même substrat, utilisés

en capacités variables, chacun disposé entre deux tronçons d'une ligne de signal qui est destinée à être connectée à une extrémité au dit port (p2) du circulateur destiné à recevoir l'antenne, et à une autre extrémité, à être reliée à l'antenne (A), la capacité de chaque micro-commutateur étant définie par la tension appliquée sur une électrode de commande respective et les caractéristiques géométriques de la membrane, l'inductance de chaque cellule étant définie par les dimensions géométriques d'un tronçon de ligne de signal correspondant.

12. Circuit d'adaptation selon la revendication 11, **caractérisé en ce que** chaque micro-commutateur du circuit d'adaptation d'impédance a la même structure que le premier et le deuxième micro-commutateur du circulateur, avec la membrane métallique qui est formée d'une unique couche d'aluminium d'épaisseur minimum de l'ordre de 2,5 microns.
13. Circulateur selon la revendication 12, **caractérisé en ce que** chaque micro-commutateur du circuit d'adaptation d'impédance est réalisée en technologie microstrip, avec un plan de masse à l'arrière du substrat.
14. Circulateur suivant l'une quelconque des revendications 12 ou 13, **caractérisé en ce que** ledit circuit d'adaptation d'impédance comprend un micro-commutateur utilisé en capacité variable (C3) supplémentaire, pour commander les électrodes de commande des capacités variables des deux micro-commutateurs du circuit d'impédance (C1, C2), l'électrode de commande (ec3) de cette capacité variable supplémentaire (C3) étant connectée à un plot de contact (PA) du circuit destiné à être connecté à l'antenne.
15. Système de télécommunication radiofréquence comprenant une antenne d'émission réception, un circuit d'émission à amplificateur, un circuit de réception à amplificateur et un premier circulateur selon l'une quelconque des revendications 1 à 14 avec un premier port (p1) comme port d'entrée connecté à la sortie du circuit d'émission, un deuxième port (p2) comme port connecté à l'antenne, un troisième port (p3) comme port de sortie connecté au circuit de réception.
16. Système de télécommunication radiofréquence selon la revendication 15, **caractérisé en ce qu'il** comprend en outre un circulateur isolateur disposé entre la sortie du circuit d'émission et le premier port (p1) dudit premier circulateur.

Patentansprüche

1. Zirkulator mit mindestens drei Ports (p1, p2, p3), einem Eingangsport (p1) zum Empfang eines Hochfrequenzsignals, das an einen Port (p2) zu übertragen ist, der bestimmt ist, mit einer Sende-/Empfangsantenne (A) verbunden zu sein, einem Ausgangs- port (p3), der imstande ist, mit einer Empfangsvorrichtung oder einer Last verbunden zu sein, **dadurch gekennzeichnet, dass** er einen ersten und einen zweiten identischen elektromechanischen Mikroschalter vom Typ Reihe (MEMS1, MEMS2) umfasst, gebildet auf einem selben Basis- substrat (1), bedeckt mit einer Passivationsschicht (2), wobei jeder hat:
 - eine bewegliche metallische Membran (m), die eine Brücke über einer Schaltzone (10) zwischen einer ersten Signalleitung (LS-IN) und einer zweiten, von der ersten Leitung isolierten Signalleitung (LS-OUT) bildet, wobei die erste und zweite Signalleitung in Verlängerung zueinander angeordnet sind, wobei die Membran (m) mindestens eine Schicht eines metallischen Materials, ausgewählt aus Al, Au oder Cu, umfasst,
 - eine auf der Passivationsschicht in der Schaltzone realisierte Spannungssteuerelektrode (3), umfassend zwei elektrisch isolierte Teile,
 - ein dielektrisches Material (4) mit einer hohen relativen Permittivität höher als Hundert und invariant mit der Frequenz, angeordnet in direktem Kontakt über der Steuerelektrode (3) und mit einer Form derart, dass gemäß der Richtung der zwei Signalleitungen die Steuerelektrode an beiden Seiten breiter ist und gemäß der orthogonalen Richtung das dielektrische Material an beiden Seiten der Steuerelektrode überragt und auf der Passivationsschicht (2) in Kontakt kommt, und
 - der erste Mikroschalter angeordnet ist, um die Übertragung eines Hoch- oder Hyperfrequenzsignals vom Eingangsport (p1), der der ersten Signalleitung (Ls1) des ersten Mikroschalters entspricht, an den Port (p2) zu erlauben, der bestimmt ist, mit einer Antenne verbunden zu sein, der der zweiten Signalleitung (Ls2) des ersten Mikroschalters entspricht,
 - der zweite Mikroschalter angeordnet ist, um die Signalübertragung zwischen dem Port (p2), der bestimmt ist, mit einer Antenne verbunden zu sein, der der ersten Signalleitung (Ls2) des zweiten Mikroschalters entspricht, an den Ausgangs- port (p3) zu erlauben, der der zweiten Signalleitung (Ls3) des zweiten Mikroschalters entspricht,

und dass er einen Impedanzadapterkreis (ADAPT) umfasst, der mit dem Port (p2) verbunden ist, der

- bestimmt ist, mit einer Antenne (A) verbunden zu sein, wobei der Adapterkreis eine Funktion eines virtuellen Hindernisses für die Übertragung oder die Reflexion eines Signals vom Port (p2) zum Eingangsport (p1) hat.
2. Zirkulator nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** er mindestens ein erstes und ein zweites Kontaktstück umfasst, um Steuerspannungen mit dem Zustand ON oder OFF auf mindestens eins der Teile der Steuerelektrode des ersten Mikroschalters und des zweiten Mikroschalters anzulegen, wobei die Aktivierungsspannungen im Bereich des Volt bis zu einigen Dutzend Volt sind, wobei die Mikroschalter gleichzeitig im OFF-Zustand oder einer im ON-Zustand und der andere im OFF-Zustand steuerbar sind.
 3. Zirkulator nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** in jedem Mikroschalter die bewegliche metallische Membran (m) an mindestens einem Ende auf einer leitenden Säule (5a, 5b) ruht, wobei die leitende Säule und die Signalleitungen (LS-IN, LS-OUT) auf der Passivationsschicht (2) realisiert sind.
 4. Zirkulator nach Anspruch 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** jeder Mikroschalter zwei parallele koplanare Masseleitungen (LM1, LM2) umfasst, die in Bezug zur ersten und zweiten Signalleitung symmetrisch angeordnet sind, wobei die Masseleitungen von den Signalleitungen mittels einer Isolationsschicht (6) getrennt sind, die aus einem Material realisiert ist, das sich von dem der ersten Passivationsschicht des Substrats unterscheidet.
 5. Zirkulator nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Steuerelektrode der Mikroschalter eine Platin-Gold-Legierung ist.
 6. Zirkulator nach einem der Ansprüche 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Signalleitungen, die Säulen und die Kontaktstücke der Mikroschalter eine erste resistive leitende Schicht aus Titan Wolfram in einem Verhältnis 80/20 mit 1 oder 2 % zirka umfassen.
 7. Zirkulator nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** in jedem der zwei Mikroschalter die Gap-Zone (g) zwischen den zwei Teilen der Steuerelektrode eine Länge von zehn Mikrometern hat.
 8. Zirkulator nach einem der vorangehenden Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** in jedem der zwei Mikroschalter die bewegliche metallische Membran (m) eine untere Schicht gegenüber der Steuerelektrode aus Titan Wolfram in einem Verhältnis 80/20 und mit einer Dicke umfasst, die geringer als die der Schicht eines metallischen Materials, ausgewählt aus Al, Au oder Cu, ist.
 9. Zirkulator nach Anspruch 1, wobei für jeden der zwei Mikroschalter die Schicht aus metallischem Material, ausgewählt aus Al, Au oder Cu, der Membran eine Dicke in der Größenordnung von 0,5 Mikron hat und die Membran eine Gesamtdicke in der Größenordnung von 0,7 Mikron hat.
 10. Zirkulator nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Impedanzadapterkreis (ADAPT) eine erste und eine zweite Zelle vom Typ LC umfasst, wobei die Elemente der Zellen in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Antenne (A) berechnet sind.
 11. Zirkulator nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Impedanzadapterkreis (ADAPT) von zwei Mikroschaltern vom Typ Reihe gebildet ist, die auf einem selben Substrat realisiert sind, verwendet mit variablen Kapazitäten, wobei jeder zwischen zwei Abschnitten einer Signalleitung angeordnet ist, die bestimmt ist, an einem Ende mit dem Port (p2) des Zirkulators verbunden zu sein, der bestimmt ist, die Antenne zu empfangen, und an einem anderen Ende mit der Antenne (A) verbunden zu sein, wobei die Kapazität jedes Mikroschalters von der Spannung, die an einer jeweiligen Steuerelektrode anliegt, und den geometrischen Merkmalen der Membran bestimmt ist, wobei die Induktanz jeder Zelle von den geometrischen Abmessungen eines entsprechenden Signalleitungsabschnitts bestimmt ist.
 12. Adapterkreis nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** jeder Mikroschalter des Impedanzadapterkreises dieselbe Struktur wie der erste und der zweite Mikroschalter des Zirkulators hat, wobei die metallische Membran von einer einzigen Aluminiumschicht mit einer Mindestdicke in der Größenordnung von 2,5 Mikron gebildet ist.
 13. Zirkulator nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** jeder Mikroschalter des Impedanzadapterkreises in Mikrostrip-Technologie mit einer Masseebene hinter dem Substrat realisiert ist.
 14. Zirkulator nach einem der Ansprüche 12 oder 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Impedanzadapterkreis einen Mikroschalter umfasst, der in zusätzlicher variabler Kapazität (C3) verwendet wird, um die Steuerelektroden der variablen Kapazitäten der zwei Mikroschalter des Impedanzkreises (C1, C2) zu steuern, wobei die Steuerelektrode (ec3) dieser zusätzlichen variablen Kapazität (C3) mit einem Kontaktstück (PA) des Kreises, das bestimmt ist, mit der Antenne verbunden zu sein, verbunden ist.
 15. Hochfrequenz-Telekommunikationssystem, umfassend

send eine Sende-Empfangs-Antenne, einen Sendekreis mit Verstärker, einen Empfangskreis mit Verstärker und einen ersten Zirkulator nach einem der Ansprüche 1 bis 14 mit einem ersten Port (p1) als Eingangsport, der mit dem Ausgang des Sendekreises verbunden ist, einem zweiten Port (p2), der mit der Antenne verbunden ist, einem dritten Port (p3) als Ausgangsport, der mit dem Empfangskreis verbunden ist.

16. Hochfrequenz-Telekommunikationssystem nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet, dass** es ferner einen isolierenden Zirkulator umfasst, der zwischen dem Ausgang des Sendekreises und dem ersten Port (p1) des ersten Zirkulators angeordnet ist.

Claims

1. A circulator with at least three ports (p1, p2, p3), an input port (p1) for receiving a radiofrequency signal to be sent to a port (p2) intended to be connected to a transmission/reception antenna (A), an output port (p3) able to be connected to a receiving device or a charge, **characterized in that** it comprises a first and second microelectromechanical identical switches of the series type (MEMS1, MEMS2) formed on a same basic substrate (1) covered with a passivation layer (2) each having:

- a moving metal membrane (m) forming a bridge above a switching zone (10) between a first signal line (LS-IN) and a second signal line (LS-OUT) insulated from the first line, the first and second signal lines arranged in the extension of one another, said membrane (m) comprising at least one layer of a metal material selected from among Al, Au or Cu,
- a voltage control electrode (3) made on the passivation layer, in said switching zone, and comprising two electrically insulated parts,
- a dielectric material (4) with a high relative permittivity above about one hundred, and not varying with the frequency, arranged in direct contact above said control electrode (3), and having a shape such that along the direction of the two signal lines, said control electrode is wider on two sides, and along the orthogonal direction, the dielectric material overflows two sides of said control electrode, and comes into contact on said passivation layer (2), and
- the first microswitch is arranged to allow the transmission of a radiofrequency or hyperfrequency signal from said input port (p1) corresponding to the first signal line (Ls1) of the first microswitch toward the port (p2) intended to be connected to an antenna, corresponding to the second signal line (Ls2) of the first microswitch,

- the second microswitch is arranged to allow the transmission of a signal between the port (p2) intended to be connected to an antenna, corresponding to the first signal line (Ls2) of the second microswitch, toward said output port (p3) corresponding to the second signal line (Ls3) of the second microswitch,

and **in that** it comprises an impedance adaptation circuit (ADAPT) connected on said port (p2) intended to be connected to an antenna (A), said adaptation circuit having a virtual obstacle function to the transmission or reflection of a signal from said port (p2) toward the input port (p1).

2. The circulator according to claim 1, **characterized in that** it comprises at least a first and second contact pad to apply control voltages to the on or off state on at least one of the parts of the control electrode of the first microswitch and the second microswitch, said control voltages being from around a volt to several tens of volts and said microswitches being able to be controlled simultaneously to the off state, or one to the on state and the other to the off state.
3. The circulator according to claim 1 or 2, **characterized in that** in each microswitch, the moving metal membrane (m) rests at least at one end on a conducting pillar (5a, 5b), and the conducting pillar and the signal lines (LS-IN, LS-OUT) are made on the passivation layer (2).
4. The circulator according to claim 2 or 3, **characterized in that** each microswitch comprises two parallel coplanar ground lines (LM1, LM2), arranged symmetrically relative to said first and second signal lines, said ground lines being separated from said signal lines by an insulating layer (6) made from a material different from that of the first passivation layer of the substrate.
5. The circulator according to claim 1, **characterized in that** said control electrode of the microswitches is a Platinum/Gold alloy.
6. The circulator according to one of claims 2 or 3, **characterized in that** the signal lines, the pillars and the contact pads of the microswitches comprise a first resistive conductive layer, made from titanium tungsten, with a proportion of 80/20 to within 1 or 2%.
7. The circulator according to claim 1, **characterized in that** in each of the two microswitches, the gap zone (g) between the two parts of the control electrode has a length of ten micrometers.
8. The circulator according to one of the preceding claims 1 to 7, **characterized in that** in each of the

two microswitches, the moving metal membrane (m) comprises a lower layer, facing the control electrode, made from titanium tungsten, with a 80/20 proportion and a thickness smaller than that of said layer of a metal material selected from among Al, Au or Cu.

9. The circulator according to claim 1, wherein for each of the two microswitches, the layer of metal material selected from among Al, Au or Cu of the membrane has a thickness of about 0.5 microns, and the membrane has a total thickness of about 0.7 microns.
10. The circulator according to claim 1, **characterized in that** said impedance adaptation circuit (ADAPT) comprises a first and second cell of the LC type, the elements of said cells being computed based on characteristics of the antenna (A).
11. The circulator according to claim 1, **characterized in that** said impedance adaptation circuit (ADAPT) is formed by two microswitches of the serial type made on a same substrate, used in variable capacities, each arranged between two segments of a signal line that is intended to be connected at one end to said port (p2) of the circulator intended to receive the antenna, and at another end, to be connected to the antenna (A), the capacity of each microswitch being defined by the voltage applied on a first active control electrode and the geometric characteristics of the membrane, the inductance of each cell being defined by the geometric dimensions of a corresponding signal line segment.
12. The adaptation circuit according to claim 11, **characterized in that** each microswitch of the impedance adaptation circuit has the same structure as the first and second microswitch of the circulator, with the metal membrane formed from a single layer of aluminum having a minimum thickness of about 2.5 microns.
13. The circulator according to claim 12, **characterized in that** each microswitch of the impedance adaptation circuit is made using microstrip technology, with a ground plane behind the substrate.
14. The circulator according to any one of claims 12 or 13, **characterized in that** said impedance adaptation circuit comprises an additional microswitch used in variable capacity (C3), to control the control electrodes of the variable capacities of the two microswitches of the impedance circuit (C1, C2), the control electrode (ec3) of this additional variable capacity (C3) being connected to a contact pad (PA) of the circuit intended to be connected to the antenna.
15. A radiofrequency telecommunications system comprising a transmission/reception antenna, an ampli-

fier transmission circuit, an amplifier reception circuit and a first circulator according to any one of claims 1 to 14 with a first port (p1) as input port connected to the output of the transmission circuit, a second port (p2) as port connected to the antenna, a third port (p3) as output port connected to the reception circuit.

16. The radiofrequency telecommunications system according to claim 15, **characterized in that** it further comprises an insulating circulator arranged between the output of the transmission circuit and the first port (p1) of said first circulator.

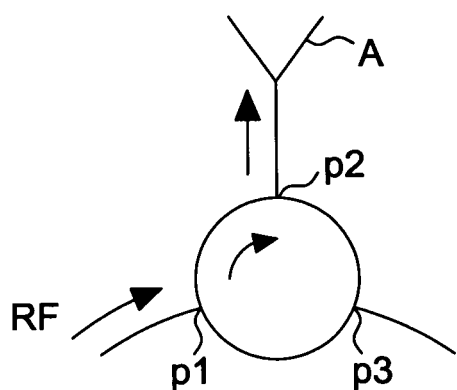


FIG. 1a

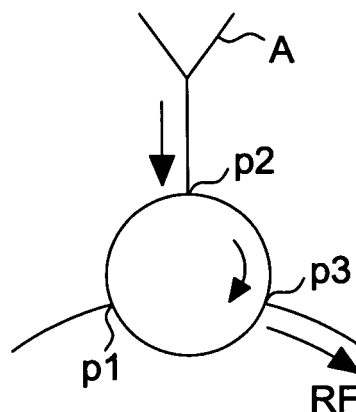


FIG. 1b

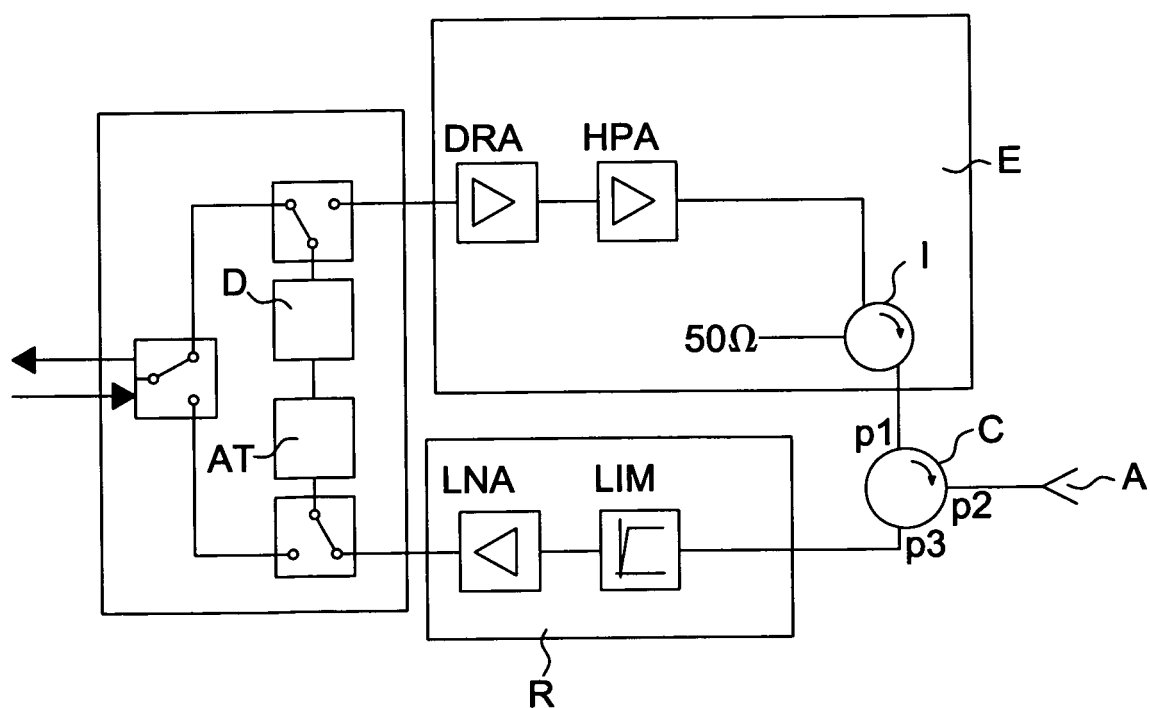


FIG. 2

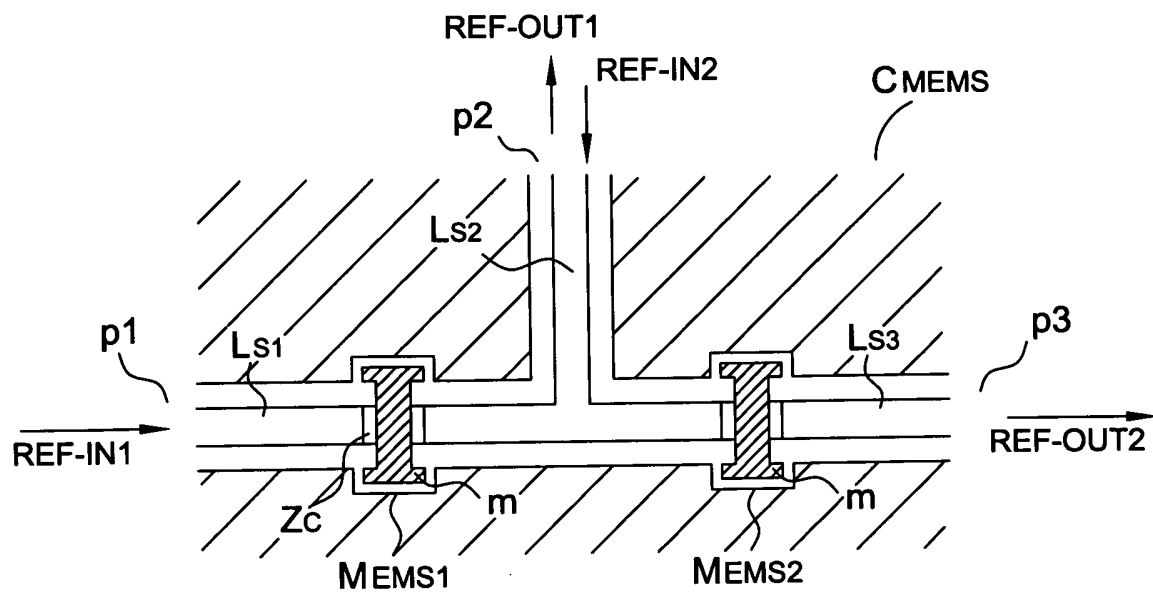


FIG.3

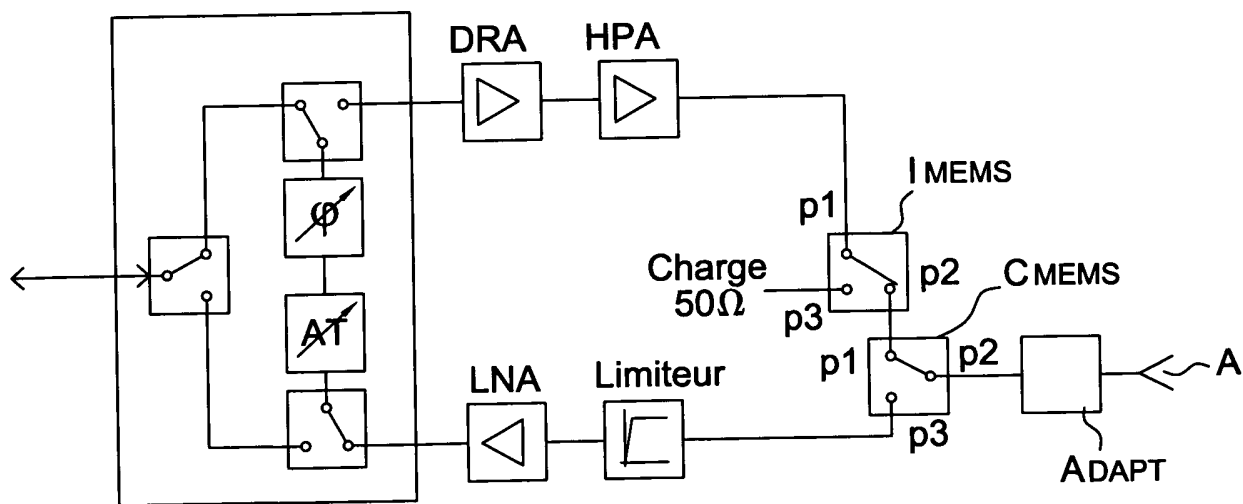


FIG.9

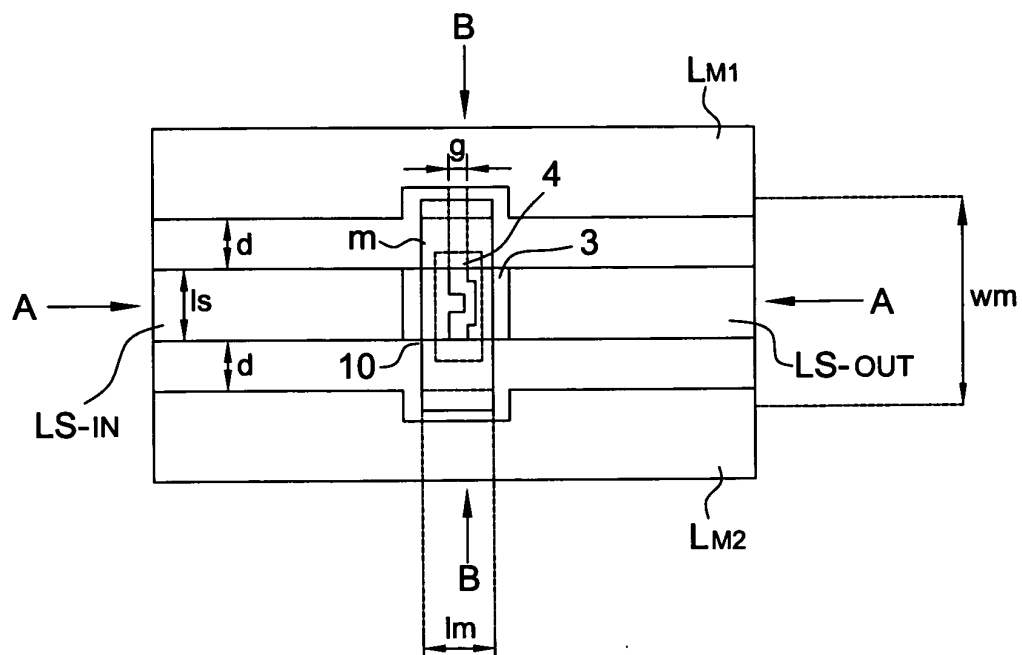


FIG. 4a

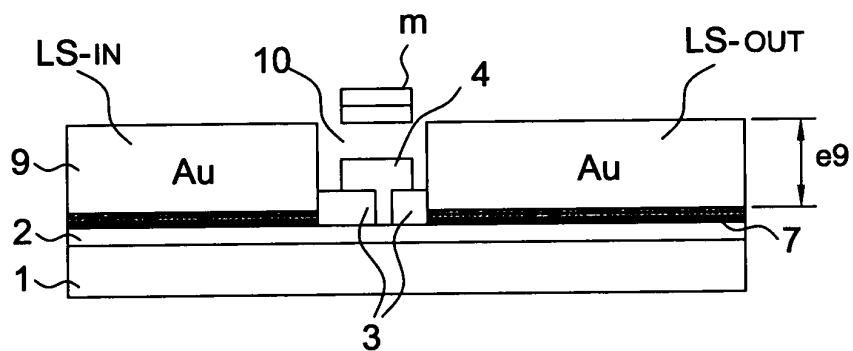


FIG. 4b

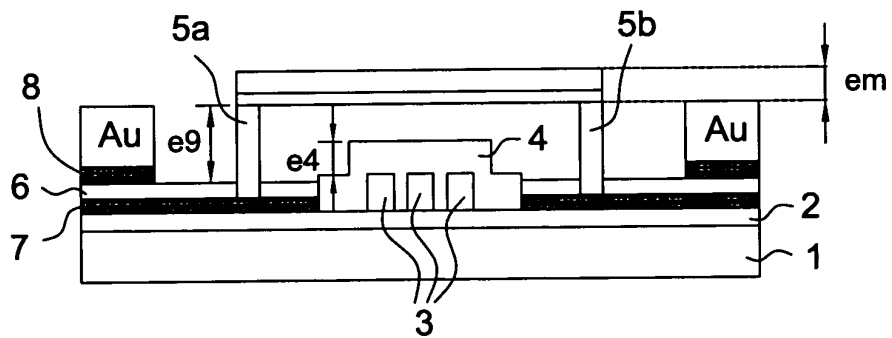


FIG. 4c

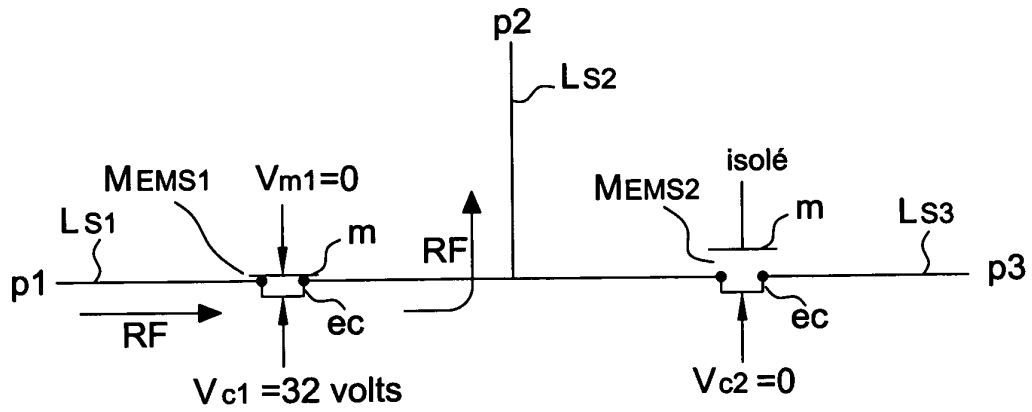


FIG.5a

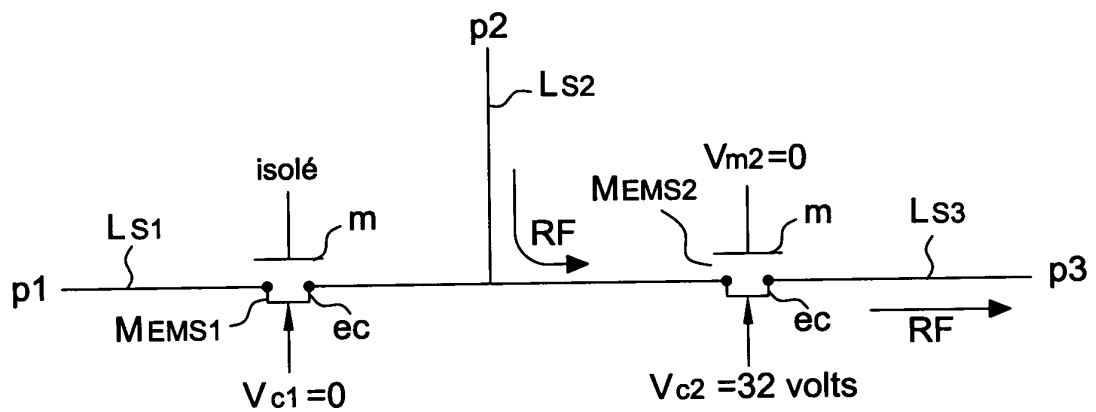


FIG.5b

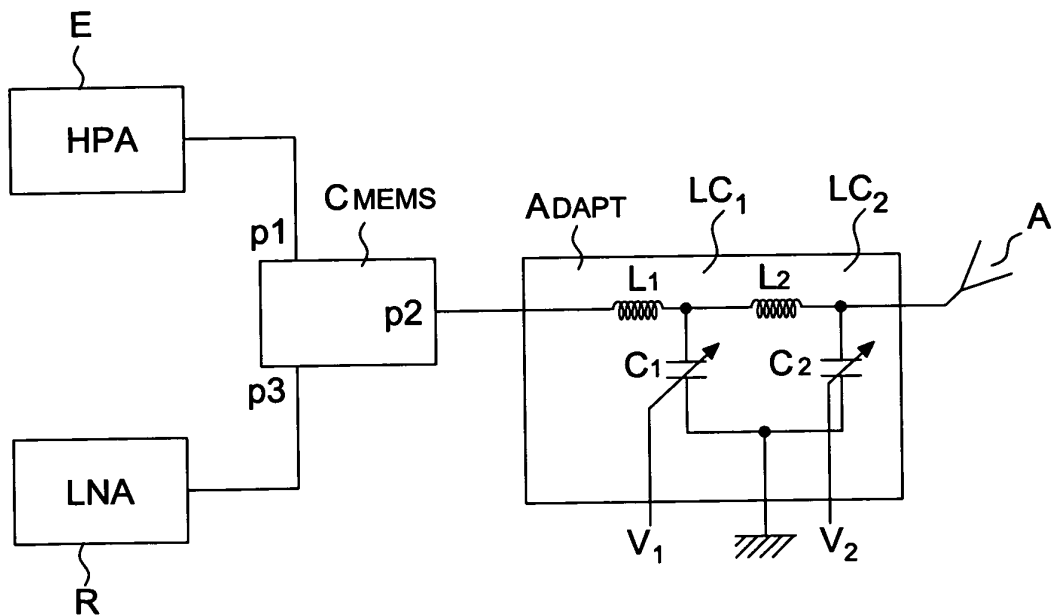


FIG.6

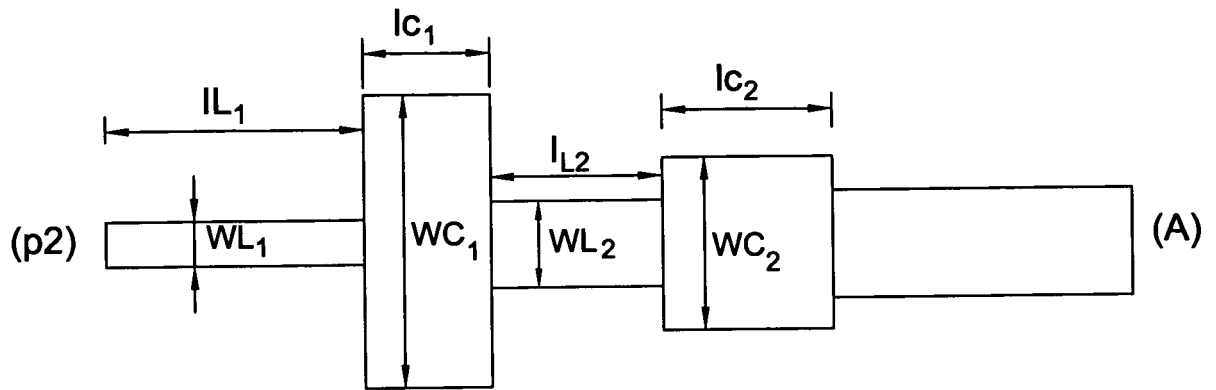


FIG.7

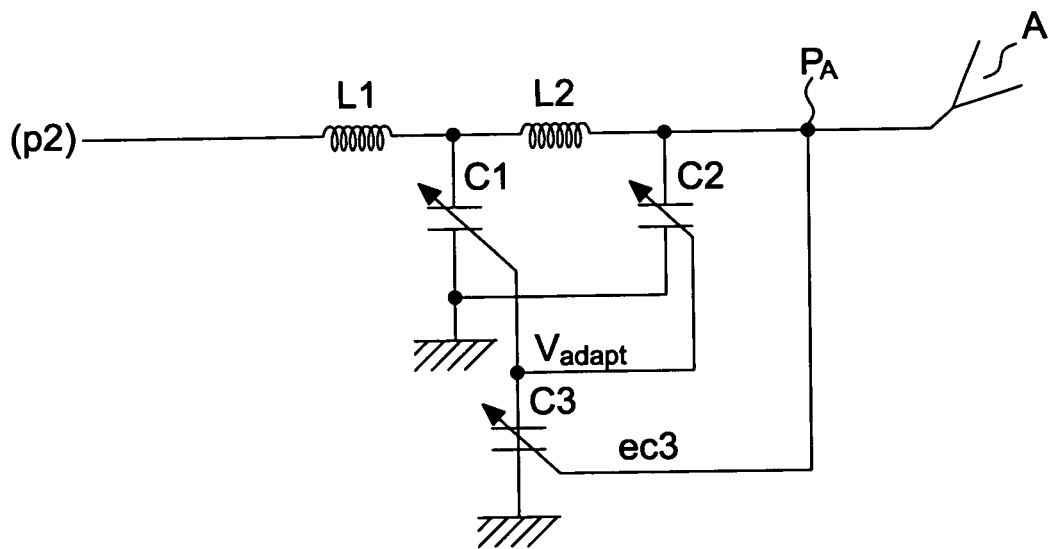
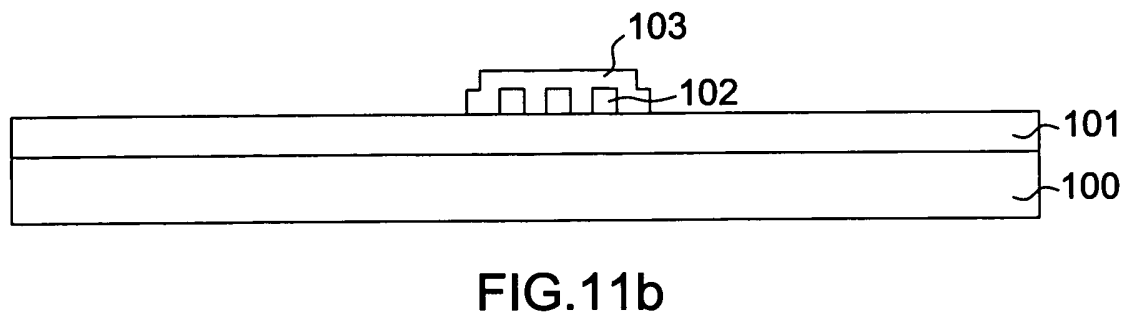
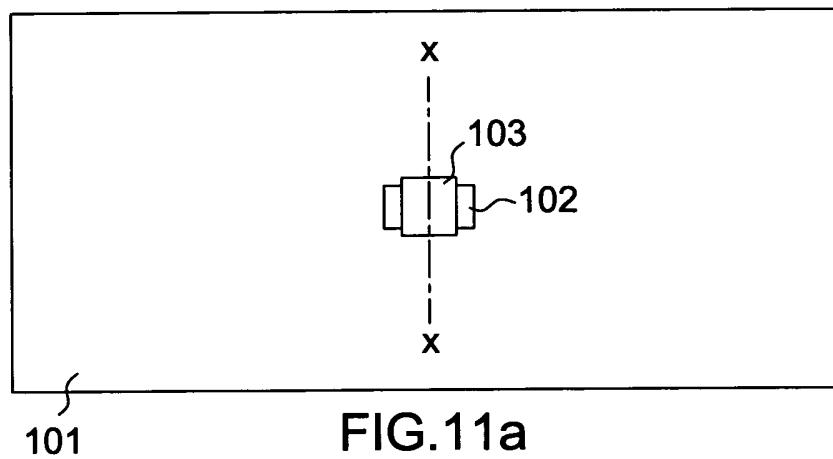
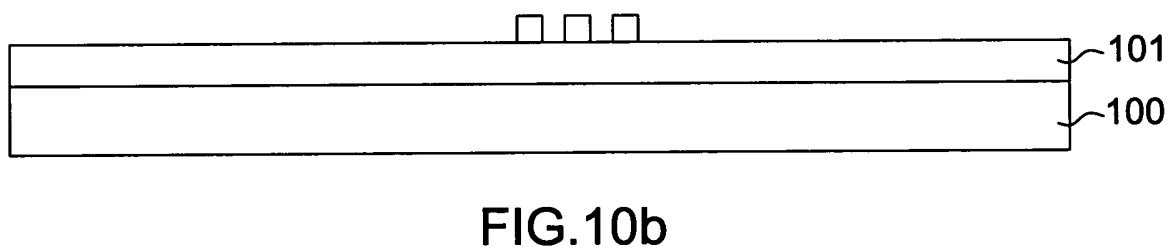
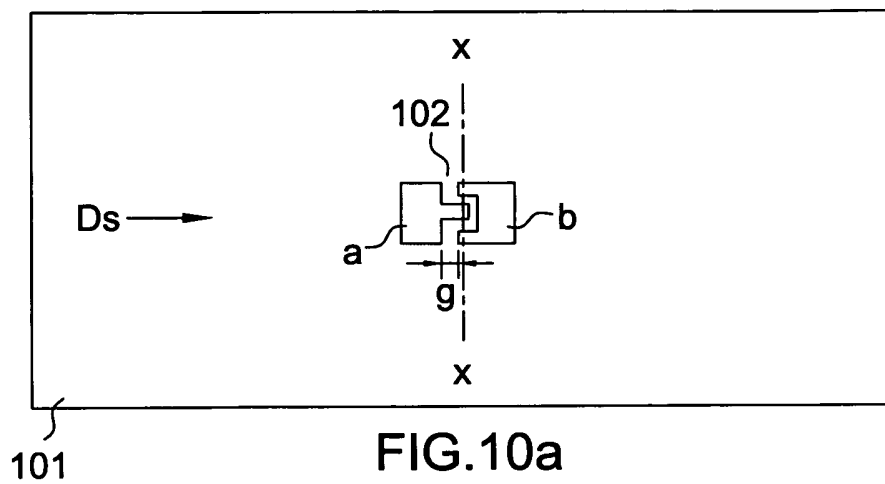


FIG.8



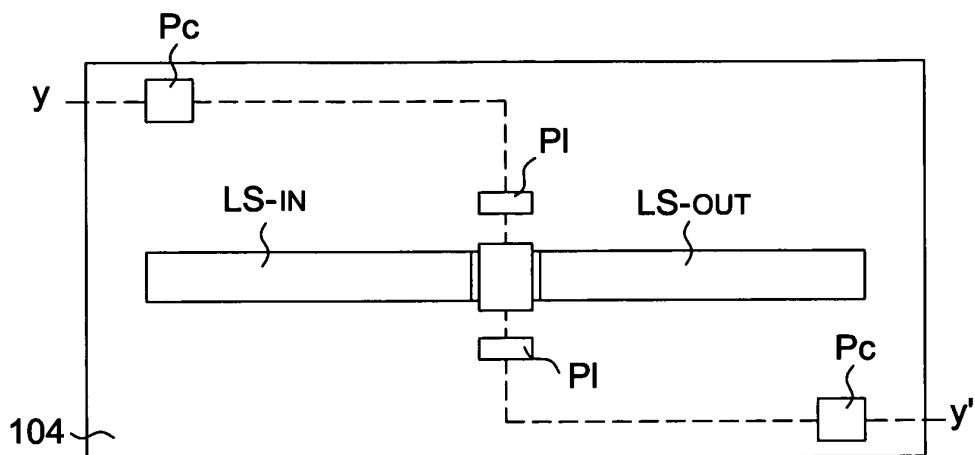


FIG. 12a

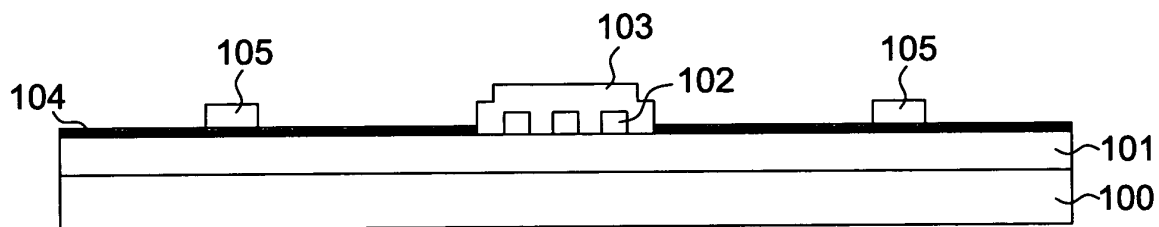


FIG. 12b

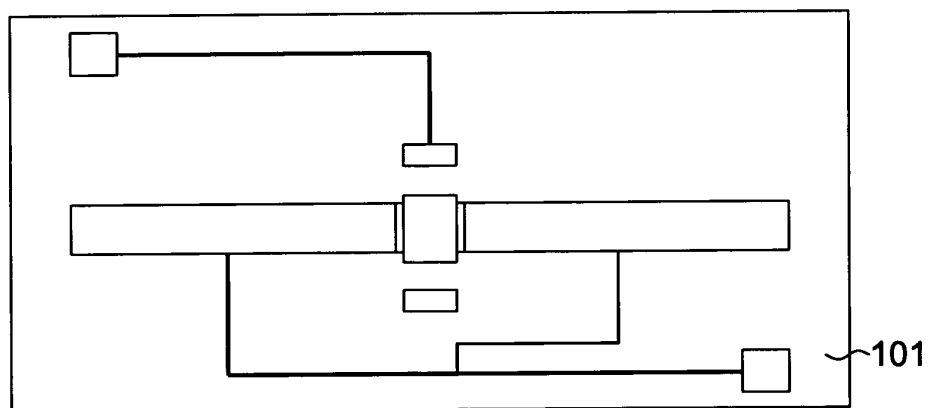


FIG. 13a

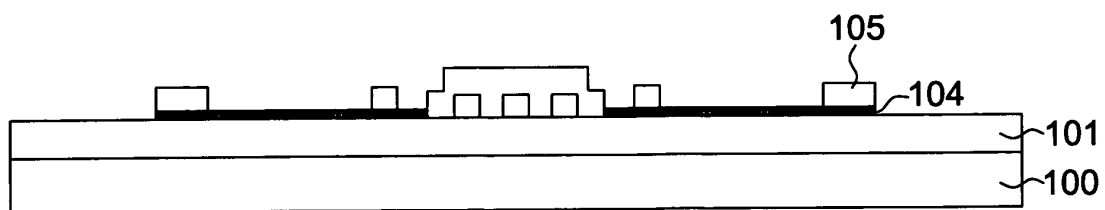


FIG. 13b

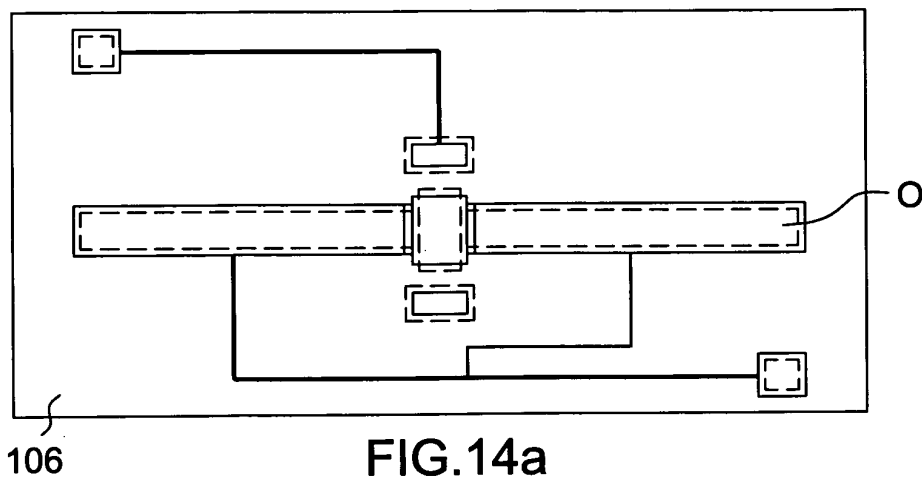


FIG. 14a

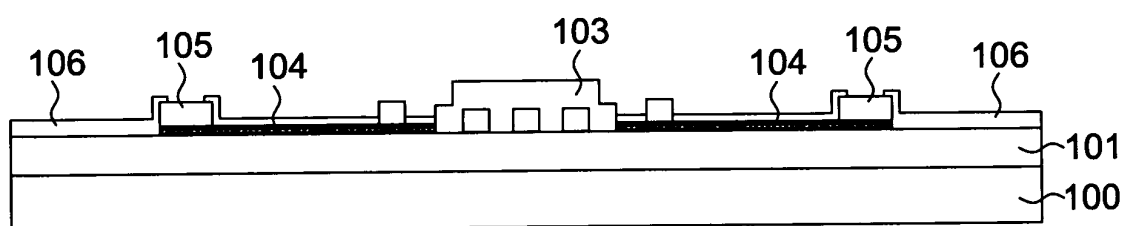


FIG. 14b

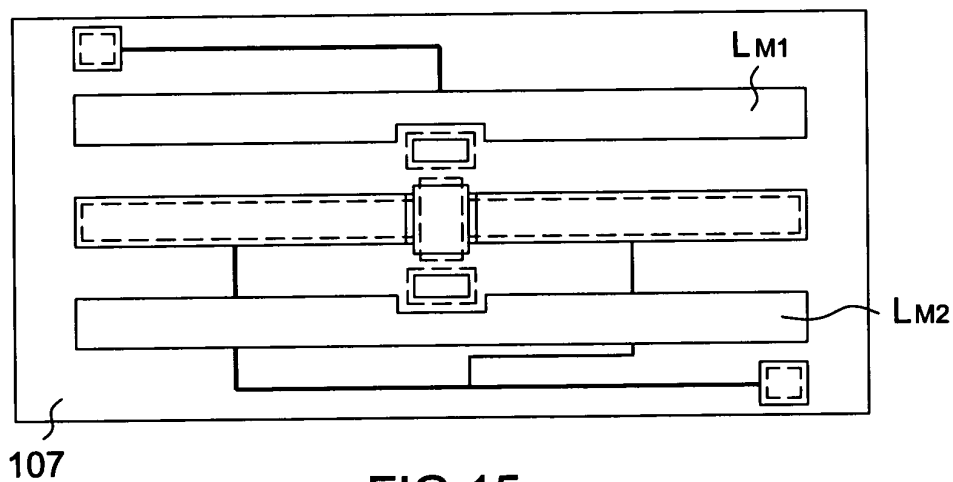


FIG. 15a

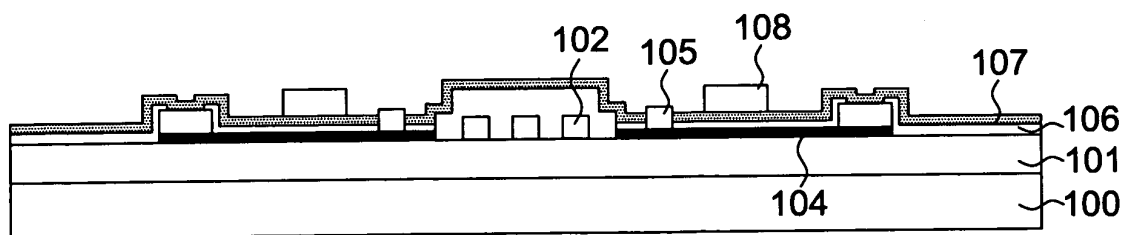
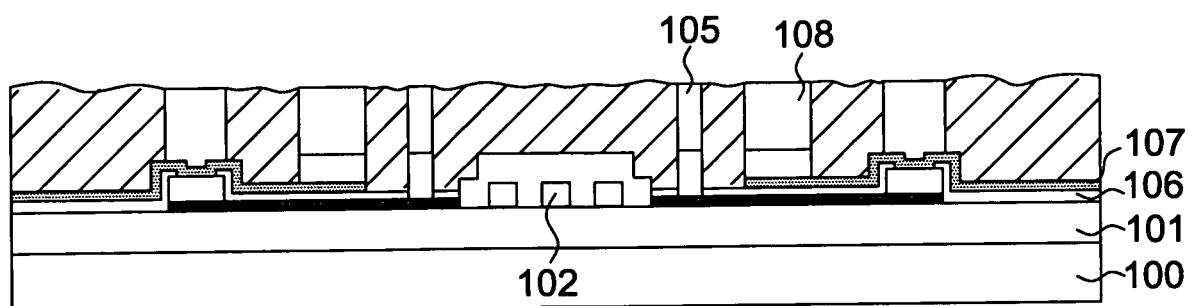
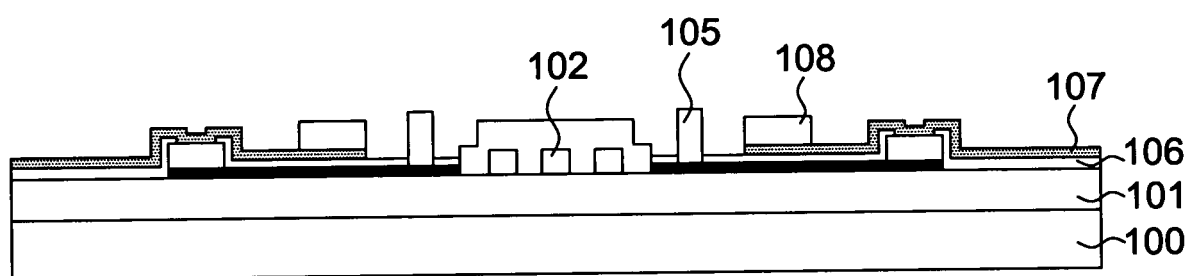
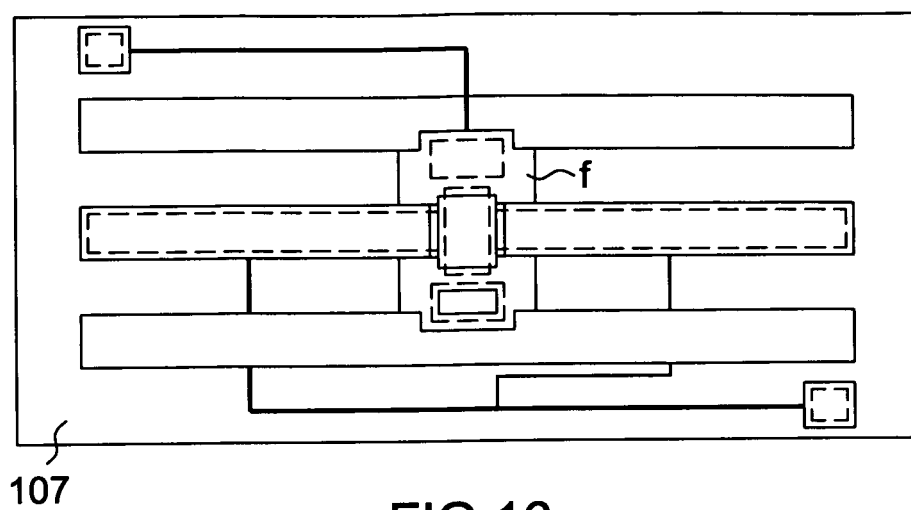


FIG. 15b



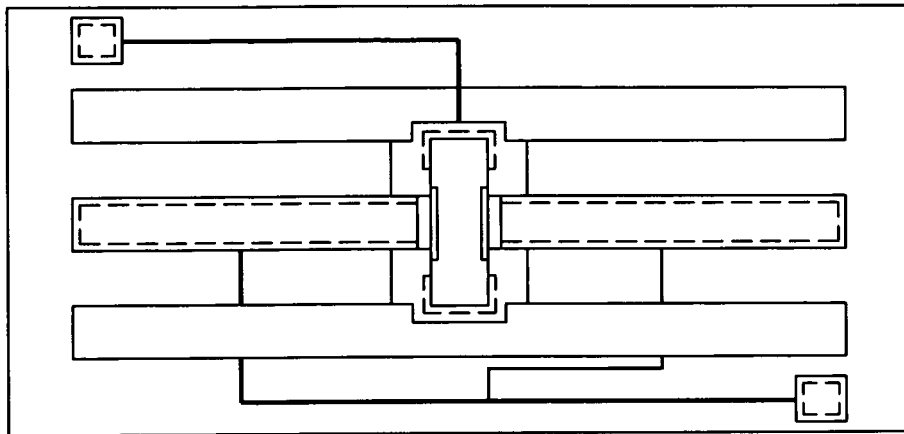


FIG. 18a

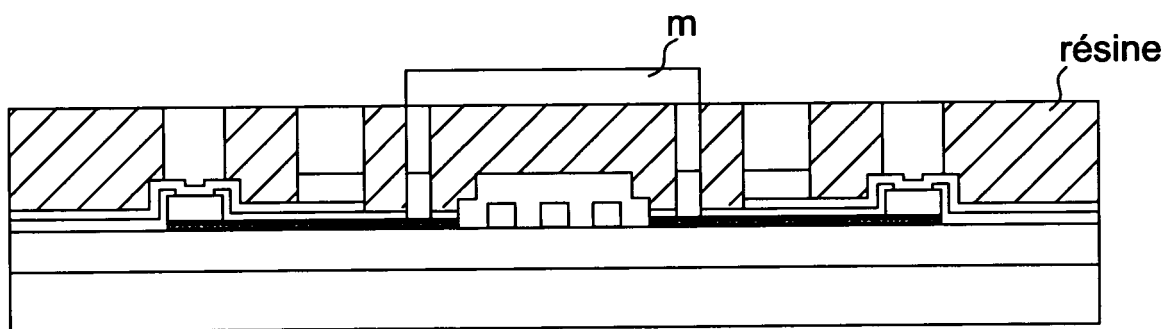


FIG. 18b

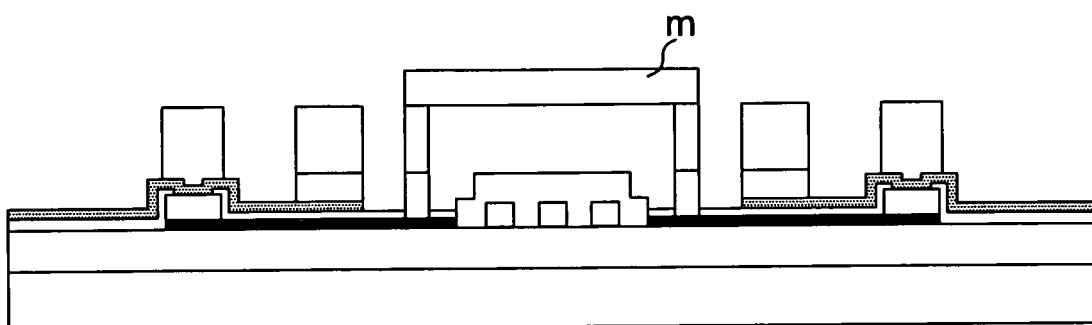


FIG. 19

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 20040127178 A [0026]
- US 6580337 B [0027]