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

(11) EP 2 317 533 B1

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention de la délivrance du brevet:
22.01.2014 Bulletin 2014/04

(51) Int Cl.:
H01H 59/00 *(2006.01)* ***H01P 1/12*** *(2006.01)*

(21) Numéro de dépôt: **10189620.7**

(22) Date de dépôt: **02.11.2010**

(54) **Micro-commutateur capacitif comportant un drain de charges à base de nanotubes orientés sur l'électrode basse et procédé de fabrication**

Kapazitiver Mikroschalter, der einen Ladungsablass aus Nanoröhren umfasst, die auf einer Steuerelektrode gerichtet sind, und Herstellungsverfahren

Capacitive micro-switch comprising a charge drain made up of directed nanotubes on the bottom electrode and method for manufacturing same

(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 RS SE SI SK SM TR

(30) Priorité: **03.11.2009 FR 0905260**

(43) Date de publication de la demande:
04.05.2011 Bulletin 2011/18

(73) Titulaire: **Thales**
92200 Neuilly Sur Seine (FR)

(72) Inventeurs:
- **Ziaei, Afshin**
  92170, Vanves (FR)
- **Le Baillif, Matthieu**
  91400, Orsay (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:
US-A1- 2006 012 940

- **CHLOE BORDAS ET AL: "Carbon Nanotube Based Dielectric for Enhanced RF MEMS Reliability", MICROWAVE SYMPOSIUM, 2007. IEEE/MTT-S INTERNATIONAL, IEEE, PI, 1 juin 2007 (2007-06-01), pages 375-378, XP031111928, ISBN: 978-1-4244-0687-6**
- **LINGBO ZHU ET AL: "Lotus effect surface for prevention of microelectromechanical system (MEMS) stiction", ELECTRONIC COMPONENTS AND TECHNOLOGY, 2005. ECTC '05. PROCEEDINGS LAKE BUENA VISTA, FL, USA MAY 31-JUNE 3, 2005, PISCATAWAY, NJ, USA, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA LNKD- DOI: 10.1109/ECTC.2005.1442039, 31 mai 2005 (2005-05-31), pages 1798-1801, XP010808933, ISBN: 978-0-7803-8907-6**

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 2 317 533 B1

Printed by Jouve, 75001 PARIS (FR)

Description

[0001] Le domaine de l'invention est celui des composants micro-systèmes encore appelés MEMS (acronyme pour Micro Electro Mechanical Systems) et plus particulièrement des micro-commutateurs radiofréquence ou hyperfréquence intégrant une membrane déformable sous l'action d'un champ électrostatique. Les domaines d'applications principaux sont les systèmes de télécommunications et les radars.

[0002] Les composants micro-systèmes se sont développés depuis quelques dizaines d'années à partir des technologies mises en oeuvre pour la réalisation des circuits électroniques.

[0003] Ils comprennent généralement une membrane ou une poutre métallique de faible épaisseur, maintenue suspendue par des supports au-dessus de surfaces conductrices isolées entre elles. Une électrode de commande placée sous les surfaces conductrices et éventuellement séparée desdites surfaces conductrices par une couche isolante complète le dispositif.

[0004] L'ensemble membrane - électrode de commande est soumis à une tension électrique au moyen de l'électrode de commande. En l'absence de tension appliquée, la membrane est suspendue au-dessus des surfaces conductrices et il n'y a aucun contact électrique entre celles-ci.

[0005] En général, on n'utilise pas les micro-commutateurs MEMS radiofréquence ou hyperfréquence en interrupteur simple. En effet, le contact direct entre la membrane et les surfaces conductrices ou l'électrode de commande diminue notablement la durée de vie du dispositif. On interpose entre les surfaces et la membrane une couche de diélectrique. On transforme ainsi la fonction simple en variation de capacité d'un condensateur dont les armatures sont constituées d'une part de la membrane et d'autre part de l'électrode de commande en regard. La capacité varie alors d'une valeur C_{up} à une valeur C_{down}.

[0006] Les principaux avantages de ce type de dispositif sont essentiellement :

- les techniques de réalisation qui sont dérivées des technologies classiques de fabrication de circuits intégrés électroniques. Elles permettent de simplifier la réalisation et l'intégration et par conséquent, d'obtenir des coûts de fabrication faibles comparés à ceux d'autres technologies, tout en garantissant une fiabilité élevée ;
- les très faibles puissances électriques consommées, quelques microwatts étant nécessaires à l'activation ;
- l'encombrement. On réalise ainsi un micro-commutateur dans une surface de l'ordre du dixième de millimètre carré, permettant d'atteindre une forte capacité d'intégration ;
- les performances hyperfréquence. Ce type de micro-commutateur présente des pertes d'insertion très faibles, de l'ordre du dixième de déciBel, bien inférieures à celles de dispositifs assurant les mêmes fonctions.

[0007] En général, la membrane supérieure déformable est réalisée par dépôt d'une ou plusieurs couches de matériaux, au moins l'une de ces couches étant un matériau conducteur. Ces matériaux sont ceux habituellement utilisés en micro-électronique.

[0008] Il est notamment connu du brevet US 2006/012940 un micro-commutateur à actuation électrostatique de type condensateur composé de deux armatures dont la première est une membrane flexible et la seconde comporte au moins une électrode de commande, les deux armatures étant séparées par une épaisseur de vide ou de gaz et au moins une couce d'au moins un matériau isolant électrique située sur l'électrode de commande.

[0009] Une application particulièrement intéressante de ces microsystèmes réside dans leur utilisation en tant que commutateurs hyperfréquences. Le fonctionnement de ce type de commutateur est notamment illustré en figure 1, 2 et 3.

[0010] Dans la position initiale, la membrane 11 se trouve à une distance d par rapport à une ligne RF 12, sur laquelle une couche de nitrure 13 est déposée comme illustré en figure 1. En supposant que la ligne RF soit également utilisée comme électrode, les deux extrémités de la membrane sont à la masse 14 comme illustré en figure 2.

[0011] Si on applique une différence de potentiel V entre l'électrode et la membrane, les deux parties sont rapprochées en attirant la membrane vers l'électrode inférieure (la piste RF).

[0012] A une valeur V de la tension, le déplacement de la membrane dépasse le tiers du gap initial. Ainsi la membrane s'effondre sur l'électrode inférieure comme illustré en figure 3. Le switch est dit en position basse et cette valeur de tension est dénommée tension d'activation.

[0013] Quand la membrane est en position haute, illustrée en figure 1, le signal RF passe dans la ligne RF sans être perturbé.

[0014] Quand la membrane est en position basse le signal passe dans la ligne RF et est court-circuité par la membrane ce qui crée une réflexion de l'onde EM (signal hyperfréquence) sur la membrane, le signal ne traverse pas le switch MEMS RF.

[0015] L'actionnement utilisé pour le switch MEMS RF de la figure 3 est un actionnement électrostatique effectué par application d'un potentiel entre la ligne (électrode basse) et la membrane (électrode haute). D'autres actionnements sont envisageables tel que les actionnements thermiques, piézoélectriques, magnétostatiques ou hybrides (utilisant deux ou plus des quatre actionnements précités).

[0016] Le type de contact entre la membrane et la ligne est de type capacitif sur le switch MEMS RF de la figure

3, c'est à dire que l'on a déposé une couche de diélectrique sur l'électrode basse. La ligne, la couche de diélectrique, le gap d'air et la membrane forment une capacité variable permettant de laisser passer ou de bloquer le signal hyperfréquence. Le second type de contact possible est le contact ohmique (métal-métal) entre la membrane et la ligne.

[0017] La ligne centrale est recouverte d'un diélectrique au niveau de la membrane pour éviter qu'il n'y ait un contact ohmic et donc une circulation de charge lorsque la membrane est à l'état bas. Cela donne l'avantage d'une consommation nulle, ou presque, de puissance pour maintenir la membrane à l'état bas en se servant de la ligne centrale comme d'électrode d'actionnement.

[0018] Cette utilisation n'est néanmoins pas sans conséquence sur la durée de vie utile du diélectrique qui au fur et à mesure des utilisations et des actionnements se charge électriquement.

[0019] En effet, lorsque la membrane atteint l'état bas, il se produit un effet de charge capacitive classique dans le diélectrique entre la ligne et la membrane, provoquant un piégeage de charge dans le diélectrique (positive si les électrons sont arrachés du diélectrique, négative si les électrons sont emprisonné dans le diélectrique).

[0020] Au fur et à mesure que le diélectrique se charge, les performances du switch sont altérées. Cela a pour effet final et irréversible de conduire à une membrane restant collée par force électrostatique au diélectrique, bloquant le Switch MEMS RF à l'état bas de manière définitive ce qui signifie la « mort » de ce switch MEMS RF.

[0021] Pour résoudre ce problème la présente invention propose un nouveau type de micro-commutateur comprenant un drain de charges électriques inséré au niveau de la couche diélectrique recouvrant la ligne RF.

[0022] Plus précisément la présente invention a pour objet un micro-commutateur à actuation électrostatique de type condensateur composé de deux armatures dont la première est une membrane flexible et la seconde comporte au moins une électrode de commande, les deux armatures étant séparées par une épaisseur de vide ou de gaz et au moins une couche d'au moins un matériau isolant électrique située sur l'électrode de commande caractérisé en ce qu'il comporte en outre un drain de charges constitué de nanotubes conducteurs orientés à la surface de ladite électrode, ledit drain étant recouvert par ladite couche de matériau isolant électrique.

[0023] Avantageusement, l'orientation des nanotubes est perpendiculaire à la surface de ladite électrode.

[0024] Selon une variante de l'invention, les nanotubes sont des nanotubes de carbone.

[0025] Selon une variante de l'invention, le matériau isolant électrique est un diélectrique.

[0026] Selon une variante de l'invention, le matériau diélectrique est de type Si_3N_4 ou ZrO_2 ou PZT.

[0027] Selon une variante de l'invention, le rapport de la hauteur des nanotubes sur l'épaisseur de la couche de matériau isolant électrique est voisin de à 0,5.

[0028] Selon une variante de l'invention, les nanotubes sont séparés entre eux d'une distance supérieure à leur hauteur, de manière à éviter des phénomènes de claquage électrique.

[0029] L'invention a aussi pour objet un procédé de fabrication d'un micro-commutateur selon l'invention, caractérisé en ce qu'il comporte

- la croissance de nanotubes orientés à la surface de l'électrode ;
- le dépôt d'une couche de matériau isolant électrique à la surface de l'électrode recouverte du drain constitué par les nanotubes.

[0030] Selon une variante de l'invention, la croissance de nanotubes orientés à la surface de l'électrode comprend la croissance de nanotubes orientés à la surface de l'électrode par croissance ou décomposition catalytique d'hydrocarbures à partir de particules catalytiques de type méthode « CVD » pour « Chemical Vapor Deposition » ou de type « PECVD » pour « Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition ».

[0031] L'invention sera mieux comprise et d'autres avantages apparaîtront à la lecture de ma description qui va suivre donnée à titre non limitatif et grâce aux figures annexées parmi lesquelles :

- les figures 1, 2 et 3 illustrent le fonctionnement et la structure d'un exemple de MEMS de type micro-commutateur RF selon l'art connu ;
- la figure 4 illustre une vue en coupe détaillée du switch MEMS RF capacitif de type shunt selon l'invention ;
- la figure 5 illustre une vue détaillée du diélectrique sous la membrane du switch MEMS RF comportant un drain de nanotubes de carbone ;
- la figure 6 illustre une étape d'élaboration de drain à partir de la croissance de nanotubes dans un procédé de fabrication d'un micro-commutateur selon l'invention.

[0032] Un exemple de micro-commutateur à actuation électrostatique de type condensateur selon l'invention est illustré en figure 4.

[0033] Il comporte, élaborée à la surface d'un substrat 40, une ligne signal RF 42, à la surface de laquelle est élaboré le drain à base de nanotubes de carbone 43 orientés et recouvert d'une couche de matériau diélectrique 44. Une membrane métallique supérieure 45 repose à la surface de piliers 41.

[0034] Typiquement, la membrane peut être composée d'une ou deux couches métalliques pouvant être par exemple une couche d'or (Au) ou une structure bi-couche d'aluminium (Al) et d'alliage de titane et de tungstène (TiW) suspendu entre les deux lignes de masse.

[0035] Typiquement, la couche de diélectrique peut être une couche de matériau diélectrique par exemple en matériau ferromagnétique pouvant typiquement être

en PZT : $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$.

[0036] Alors que selon l'art antérieur, la ligne signal est directement recouverte par la couche de matériau diélectrique, ce dernier est soumis à des décharges électriques lorsque la membrane atteint son état bas du fait de la forte tension nécessaire à l'actionnement et de la très petite distance qui résulte à la fin lorsque la membrane touche le diélectrique. Cela entraîne un chargement du diélectrique au fur et à mesure qui devient critique lorsque la charge accumulée est suffisante pour retenir la membrane à l'état bas de manière définitive.

[0037] Ainsi, l'invention propose une solution consistant à réaliser des switchs MEMS RF capacitifs dont la couche de diélectrique est constituée de deux éléments : une forêt de nanotubes de carbones orientés, verticaux sur laquelle on vient déposer la couche de diélectrique normalement usitée pour la réalisation de switch MEMS capacitifs.

[0038] Ceci permet une réduction conséquente du chargement du diélectrique en créant des chemins de conduction évacuant le surplus ou bien comblant les déficiences en électrons entraînant de manière directe, une augmentation de la durée de vie du switch MEMS RF capacitif, de manière significative.

[0039] Par ailleurs, le maillage de nanotubes est transparent au fonctionnement du switch MEMS RF capacitif et donc ne constitue pas une perturbation pour les performances de ce dernier.

[0040] Plus précisément, la couche de diélectrique ainsi séparée en deux par un dépôt intermédiaire de composés nano-structurés permet d'obtenir une couche médiane conductrice permettant l'apport ou bien l'évacuation de porteurs de charge à l'intérieur du diélectrique pour éviter que ce dernier ne se charge lors du fonctionnement du switch MEMS RF.

[0041] Cela a pour effet d'augmenter la durée de vie en nombre de cycle de ces switchs MEMS RF.

[0042] On sait de manière détaillée que les charges de la partie supérieure du diélectrique sont rapidement emprisonnées mais très lentement libérées contrairement à celle de la partie inférieure du diélectrique en contact avec une couche métallique.

[0043] La figure 5 illustre plus en détails l'ensemble constitué par le drain de nanotubes et de diélectrique et schématise par des flèches la mobilité des charges le long des nanotubes.

[0044] L'intérêt d'intégrer des nanotubes dans le diélectrique et de pouvoir « drainer » ces charges de la partie supérieure du diélectrique vers la partie inférieur en contact avec une surface métallique. Cela permet de libérer les charges ainsi emprisonnées plus facilement et donc augmenter la durée de vie des switchs.

[0045] La conductivité induite par la présence de ces nanotubes reste négligeable et ne perturbe pas le fonctionnement des switchs MEMS RF.

[0046] La figure 6 illustre plus en détails, l'opération de croissance des nanotubes à la surface de la ligne RF constituée d'une ligne métallique. Il peut avantageusement s'agir d'une opération classique de croissance sous champ électrique à partir d'éléments de catalyse 43c répartis les uns par rapport aux autres à la surface de l'électrode inférieure 42, et mis sous un plasma d'hydrocarbures génèrent la croissance de nanotubes orientés 43.

Revendications

1. Micro-commutateur à actuation électrostatique de type condensateur composé de deux armatures dont la première est une membrane flexible (45) et la seconde comporte au moins une électrode de commande (42), les deux armatures étant séparées par une épaisseur de vide ou de gaz et au moins une couche d'au moins un matériau isolant électrique (44) située sur l'électrode de commande **caractérisé en ce qu'**il comporte en outre un drain de charges (43) constitué de nanotubes conducteurs orientés à la surface de ladite électrode, ledit drain étant enrobé par ladite couche de matériau isolant électrique.

2. Micro-commutateur à actuation électrostatique selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les nanotubes sont des nanotubes de carbone.

3. Micro-commutateur à actuation électrostatique selon l'une des revendications 1 ou 2, **caractérisé en ce que** le matériau isolant électrique est un matériau diélectrique.

4. Micro-commutateur à actuation électrostatique selon la revendication 3, **caractérisé en ce que** le matériau diélectrique est de type Si_3N_4 ou $Zr0_2$ ou PZT.

5. Micro-commutateur selon l'une des revendications 1 ou 2, **caractérisé en ce que** le rapport de la hauteur des nanotubes sur l'épaisseur de la couche de matériau isolant électrique est voisin de à 0,5.

6. Micro-commutateur à actuation électrostatique selon l'une des revendications 1 à 5, **caractérisé en ce que** les nanotubes sont séparés entre eux d'une distance supérieure à leur hauteur, de manière à éviter des phénomènes de claquage électrique.

7. Procédé de fabrication d'un micro-commutateur selon l'une des revendications 1 à 6, **caractérisé en ce qu'**il comporte

   - la croissance de nanotubes orientés à la surface de l'électrode ;
   - le dépôt d'une couche de matériau isolant électrique à la surface de l'électrode recouverte du drain constitué par les nanotubes.

8. Procédé de fabrication d'un micro-commutateur se-

lon la revendication 7, **caractérisé en ce que** la croissance de nanotubes orientés à la surface de l'électrode comprend la croissance par la décomposition catalytique d'hydrocarbures à partir de particules catalytiques.

Patentansprüche

1. Mikroschalter mit elektrostatischer Betätigung vom Kondensatortyp, bestehend aus zwei Ankern, von denen der erste eine flexible Membran (45) ist und der zweite wenigstens eine Steuerelektrode (42) umfasst, wobei die beiden Anker durch eine Vakuum- oder Gasdicke und wenigstens eine Schicht aus wenigstens einem elektrisch isolierenden Material (44) getrennt sind, die sich auf der Steuerelektrode befindet, **dadurch gekennzeichnet, dass** er darüber hinaus eine Ladungssenke (43) umfasst, die von leitenden Nanoröhren gebildet wird, die auf der Oberfläche der Elektrode orientiert sind, wobei die Senke von der Schicht aus elektrisch isolierendem Material umhüllt ist.

2. Mikroschalter mit elektrostatischer Betätigung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Nanoröhren Kohlenstoffnanoröhren sind.

3. Mikroschalter mit elektrostatischer Betätigung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** das elektrisch isolierende Material ein dielektrisches Material ist.

4. Mikroschalter mit elektrostatischer Betätigung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** das dielektrische Material vom Typ Si_3N_4 oder $Zr0_2$ oder PZT ist.

5. Mikroschalter nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Verhältnis zwischen der Höhe der Nanoröhre und der Dicke der Schicht aus elektrisch isolierendem Material bei nahe 0,5 liegt.

6. Mikroschalter mit elektrostatischer Betätigung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Nanoröhren durch einen Abstand voneinander getrennt sind, der größer ist als ihre Höhe, so dass elektrische Durchschlagphänomene vermieden werden.

7. Verfahren zur Herstellung eines Mikroschalters nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** es Folgendes beinhaltet:

   - Aufwachsenlassen von Nanoröhren, die auf der Oberfläche der Elektrode orientiert sind;
   - Absetzen einer Schicht aus elektrisch isolierendem Material auf die Oberfläche der Elektrode, bedeckt von der von den Nanoröhren gebildeten Senke.

8. Verfahren zur Herstellung eines Mikroschalters nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Aufwachsenlassen der auf der Oberfläche der Elektrode orientierten Nanoröhren das Aufwachsenlassen durch katalytisches Absetzen von Kohlenwasserstoffen ausgehend von katalytischen Partikeln beinhaltet.

Claims

1. Electrostatic actuation micro-switch of the capacitor type comprising two armatures, the first of which is a flexible membrane (45) and the second of which comprises at least one control electrode (42), the two armatures being separated by a thickness of vacuum or gas and at least one layer of at least one electrically insulating material (44) which is located on the control electrode, **characterised in that** it further comprises a charge drain (43) which is constituted by conductive nanotubes which are orientated on the surface of said electrode, said drain being coated by said layer of electrically insulating material.

2. Electrostatic actuation micro-switch according to claim 1, **characterised in that** the nanotubes are carbon nanotubes.

3. Electrostatic actuation micro-switch according to claim 1 or 2, **characterised in that** the electrically insulating material is a dielectric material.

4. Electrostatic actuation micro-switch according to claim 3, **characterised in that** the dielectric material is of the Si_3N_4 or ZrO_2 or PZT type.

5. Micro-switch according to claim 1 or 2, **characterised in that** the relationship of the height of the nanotubes to the thickness of the layer of electrically insulating material is around 0.5.

6. Electrostatic actuation micro-switch according to any one of claims 1 to 5, **characterised in that** the nanotubes are separated from each other by a distance greater than the height thereof so as to prevent electrical breakdown phenomena.

7. Method for producing a micro-switch according to any one of claims 1 to 6, **characterised in that** it comprises
   growing nanotubes which are orientated on the surface of the electrode;
   depositing a layer of electrically insulating material on the surface of the electrode covered with the drain

constituted by the nanotubes.

8. Method for producing a micro-switch according to claim 7, **characterised in that** the growth of nanotubes which are orientated on the surface of the electrode comprises the growth by catalytic decomposition of hydrocarbons from catalytic particles.

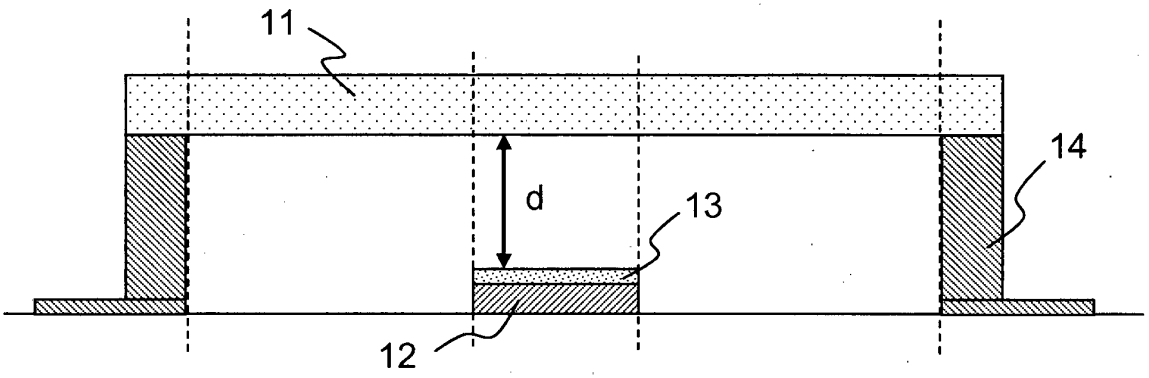


FIG.1

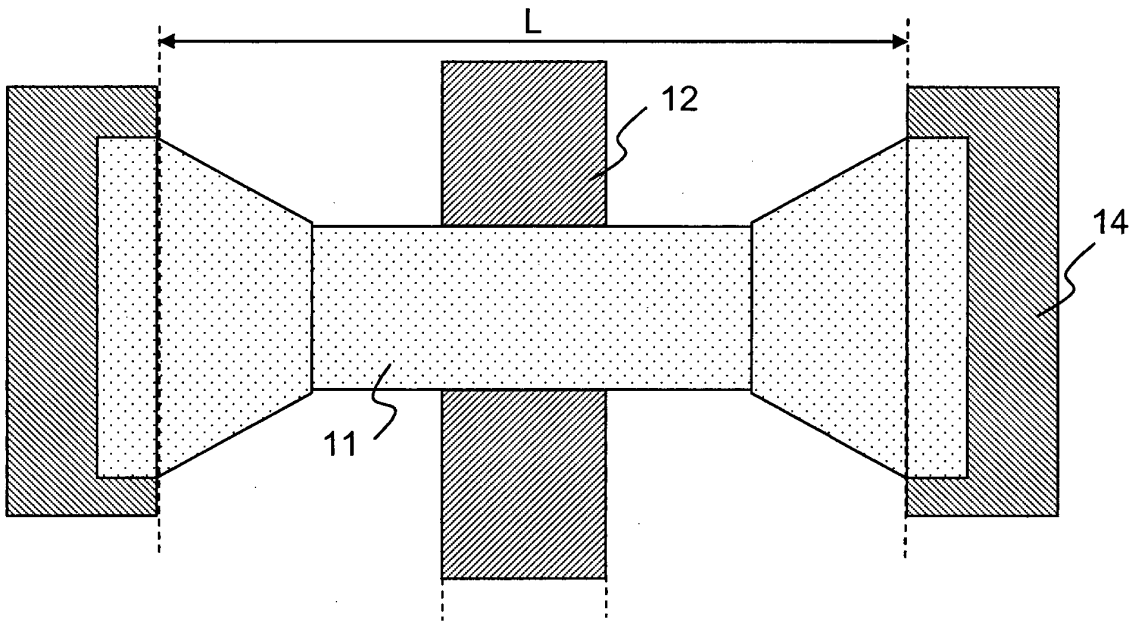


FIG.2

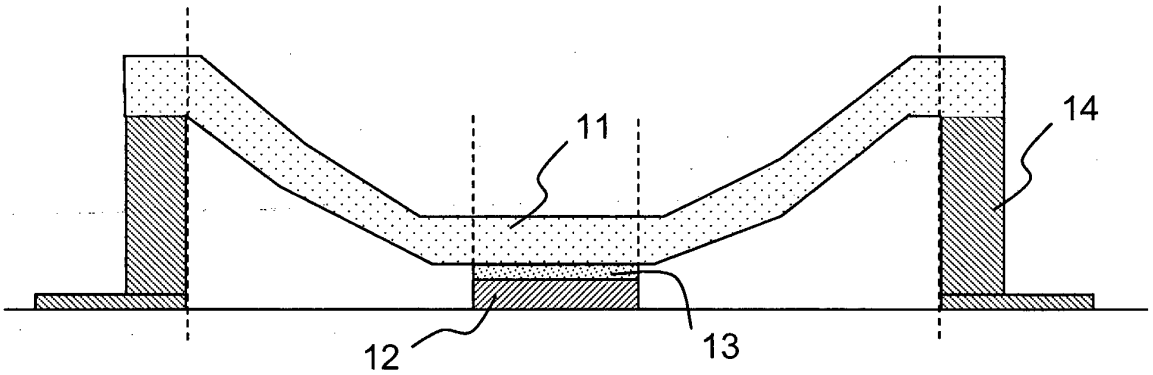


FIG.3

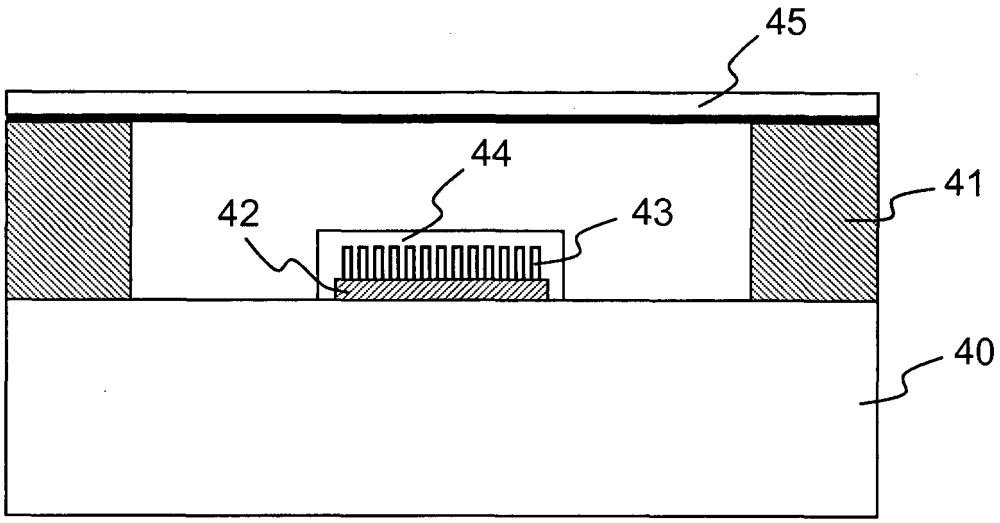


FIG.4

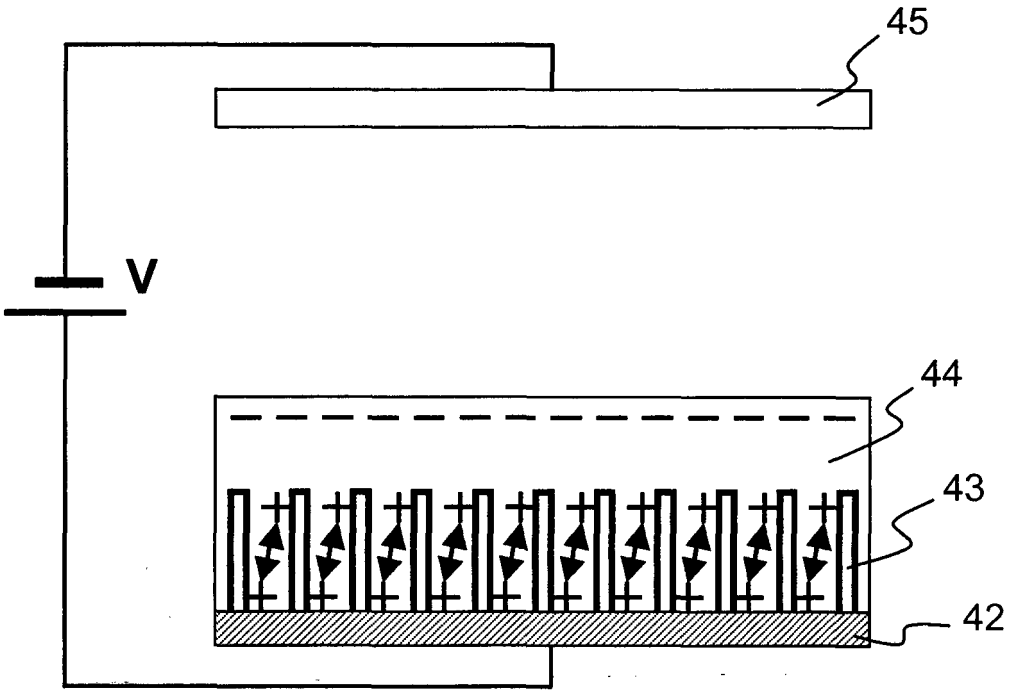


FIG.5

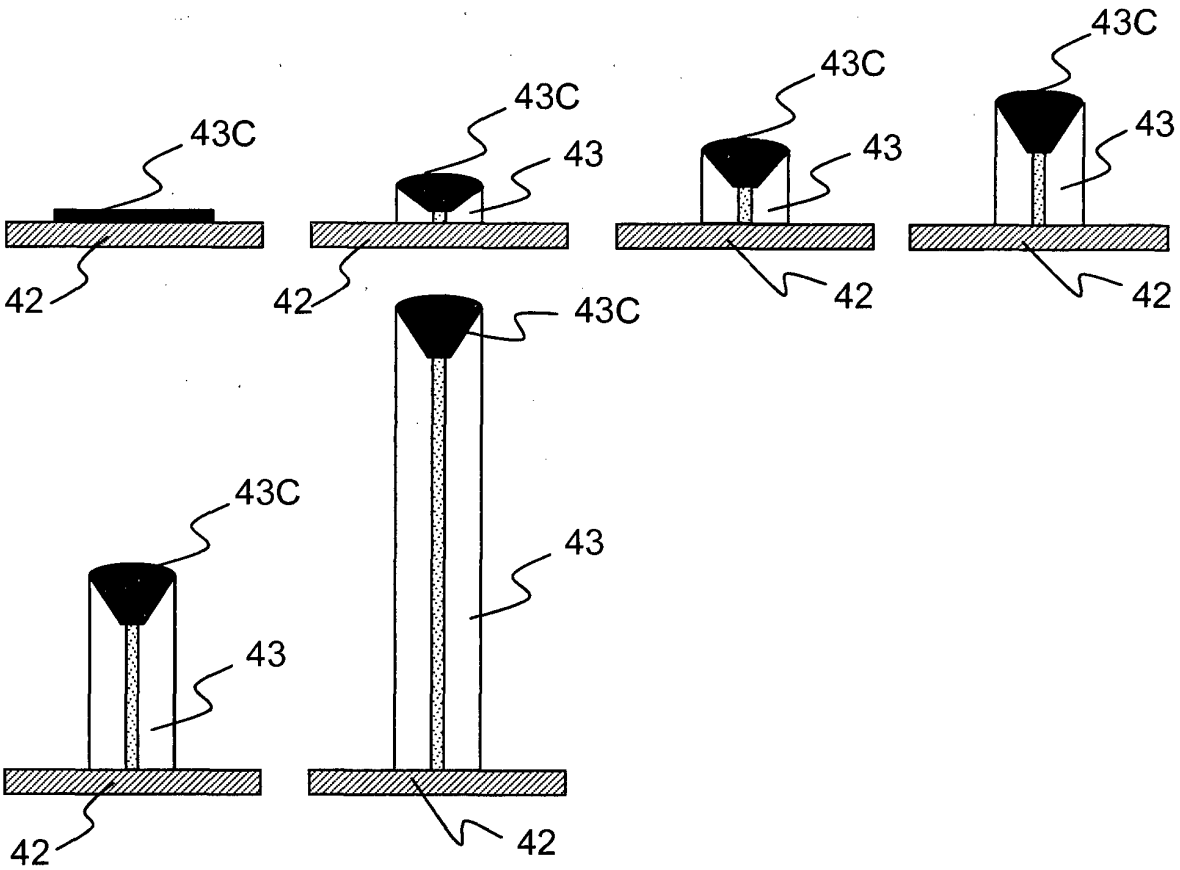


FIG.6

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 2006012940 A **[0008]**