



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
01.02.2017 Bulletin 2017/05

(51) Int Cl.:
H01Q 1/22 (2006.01) **H01Q 3/46 (2006.01)**
H01Q 21/00 (2006.01) **H01Q 23/00 (2006.01)**

(21) Numéro de dépôt: **16181407.4**

(22) Date de dépôt: **27.07.2016**

(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
Etats d'extension désignés:
BA ME
Etats de validation désignés:
MA MD

(72) Inventeurs:
• **Clemente, Antonio**
38180 Seyssins (FR)
• **Dussopt, Laurent**
38100 Grenoble (FR)
• **Reig, Bruno**
38430 Moirans (FR)

(30) Priorité: **28.07.2015 FR 1557207**

(74) Mandataire: **Talbot, Alexandre et al**
Cabinet Hecké
Europole
10, rue d'Arménie - BP 1537
38025 Grenoble Cedex 1 (FR)

(71) Demandeur: **Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives**
75015 Paris (FR)

(54) **CELLULE ELEMENTAIRE D'UN RESEAU TRANSMETTEUR POUR UNE ANTENNE RECONFIGURABLE**

(57) Cette cellule élémentaire comporte une antenne de réception (2), une antenne de transmission (3), et comprenant des première et deuxième surfaces de rayonnement séparées entre elles par une zone de séparation, un circuit de déphasage comprenant des commutateurs (4) présentant chacun un état passant, respectivement bloqué, dans lequel le commutateur (4) correspondant autorise, respectivement bloque, une circulation d'un courant entre les première et deuxième surfaces de rayonnement ; un plan de masse (5) ; une pre-

mière carte (6) de circuit imprimé comprenant une première surface (60) munie de l'antenne de réception (2), et une seconde surface opposée munie du plan de masse (5) ; une tranche (7) d'un matériau semi-conducteur comprenant une première surface (70) munie des première et deuxième surfaces de rayonnement, et en ce que les commutateurs (4) sont formés dans la zone de séparation, de manière monolithique avec l'antenne de transmission (3).

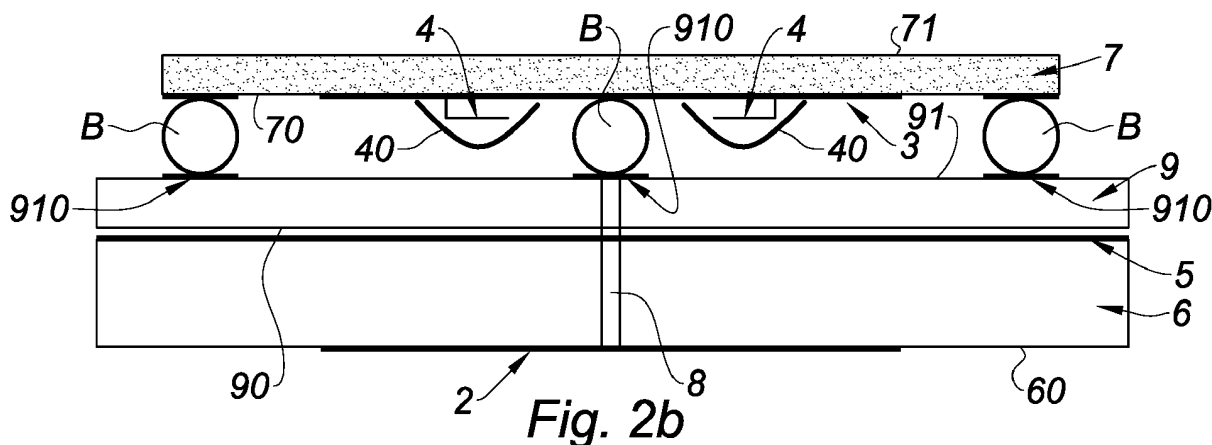


Fig. 2b

Description

Domaine technique

[0001] La présente invention a trait à une cellule élémentaire d'un réseau transmetteur pour une antenne reconfigurable à une fréquence de fonctionnement, de préférence comprise entre 30 GHz et 110 GHz. La présente invention a également trait à une antenne reconfigurable comportant un réseau transmetteur comprenant de telles cellules élémentaires.

[0002] Par « reconfigurable », on entend qu'au moins une caractéristique de l'antenne peut être modifiée au cours de sa durée de vie, après sa fabrication. La ou les caractéristiques généralement modifiables sont la réponse fréquentielle, le diagramme de rayonnement (appelé également faisceau), et la polarisation. La reconfiguration de la réponse fréquentielle couvre différentes fonctionnalités telles que la commutation de fréquences, l'accord en fréquence, la variation de bande passante, le filtrage fréquentiel etc. La reconfiguration du diagramme de rayonnement couvre différentes fonctionnalités telles que le balayage angulaire de la direction de pointage du faisceau (appelé également dépointage), l'ouverture du faisceau (c'est-à-dire la concentration du rayonnement suivant une direction particulière), le filtrage spatial, la formation d'un faisceau ou d'un multifaisceau (par exemple plusieurs faisceaux étroits remplaçant un faisceau large) etc.

[0003] Concernant la reconfiguration du diagramme de rayonnement, il existe différents types d'antenne reconfigurable, notamment :

- une antenne réseau à commande de phase (« *Phased array antenna* » en langue anglaise),
- une antenne à réseau réflecteur (« *Reflectarray antenna* » en langue anglaise),
- une antenne à réseau transmetteur (« *Transmitarray antenna* » en langue anglaise).

[0004] De telles antennes reconfigurables sont particulièrement avantageuses à partir de la bande C (4-8 GHz) jusqu'à la bande W (75-110 GHz) pour les applications suivantes :

- radars automobiles d'assistance et d'aide à la conduite, dans une perspective de sécurité active,
- systèmes d'imagerie et de surveillance à très haute résolution,
- systèmes de communications à très haut débit en ondes millimétriques (communications inter-bâtiments ou intra-bâtiment en environnement domotique ou immotique),
- liaisons de télémesure sol-satellite en orbite basse LEO (pour *Low Earth Orbit* en langue anglaise) en bande Ka, télécommunications par satellite avec source primaire reconfigurable (SOTM™ pour *Satcom-on-the-Move* en langue anglaise, Internet, Télé-

vision etc.),

- systèmes de liaison point-à-point et point-à-multi-point (réseaux métropolitains, systèmes « *Fronthaul* » et « *Backhaul* » pour les réseaux cellulaires, accès radio pour les réseaux mobiles de cinquième génération etc.).

[0005] La présente invention concerne plus précisément une antenne reconfigurable à réseau transmetteur aux fréquences millimétriques. Un réseau transmetteur comporte au moins une source de rayonnement, émettant de préférence dans un domaine spectral compris entre 30 GHz et 110 GHz, la ou les sources de rayonnement irradiant un ensemble de cellules élémentaires.

Etat de la technique antérieure

[0006] Une cellule élémentaire d'un réseau transmetteur connue de l'état de la technique, notamment du document WO 2012/085067, comporte :

- une antenne de réception, planaire, destinée à recevoir une onde incidente ;
- une antenne de transmission, planaire, destinée à transmettre l'onde incidente avec un déphasage, et comprenant des première et deuxième surfaces de rayonnement séparées entre elles par une zone de séparation de manière à être électriquement isolées, l'antenne de transmission et l'antenne de réception étant électriquement connectées entre elles ;
- un circuit de déphasage configuré pour introduire le déphasage, et comprenant des commutateurs présentant chacun un état passant, respectivement bloqué, dans lequel le commutateur correspondant autorise, respectivement bloque, une circulation d'un courant entre les première et deuxième surfaces de rayonnement de l'antenne de transmission ;
- un plan de masse de part et d'autre duquel l'antenne de réception et l'antenne de transmission sont disposées ;
- une première carte de circuit imprimé comprenant une première surface munie de l'antenne de réception, et une seconde surface opposée munie du plan de masse,
- une deuxième carte de circuit imprimé comprenant une première surface assemblée sur le plan de masse au moyen d'un film de collage, et une seconde surface opposée munie de l'antenne de transmission, la première surface pouvant être munie de lignes de polarisation des commutateurs.

[0007] Le circuit de déphasage de chaque cellule élémentaire permet de reconfigurer le diagramme de rayonnement de l'antenne à réseau transmetteur. Les commutateurs permettent de modifier la phase de l'onde transmise par chaque cellule élémentaire du réseau. Un tel réseau transmetteur comporte de nombreux avantages :

- l'efficacité énergétique aux fréquences micro-ondes et notamment millimétriques (de l'ordre de quelques GHz) grâce à la transmission dans l'air entre la ou les sources de rayonnement et les cellules élémentaires,
- un encombrement, une masse et un coût de réalisation réduits grâce à la technologie planaire utilisée (antennes planaires sur cartes de circuit imprimé),
- un diagramme de rayonnement pourvu d'une bonne pureté de polarisation car les imperfections peuvent se compenser mutuellement au sein du réseau,
- un diagramme de rayonnement pourvu d'une bonne qualité quant à la forme du faisceau et des lobes secondaires grâce à la position de la ou des sources de rayonnement situées à l'opposé du faisceau généré par le réseau.

[0008] Afin d'obtenir des performances satisfaisantes, la dimension caractéristique des cellules élémentaires doit être inférieure ou égale à la demi-longueur d'onde de la ou des sources de rayonnement. Lorsque le domaine spectral de la ou des sources de rayonnement est compris notamment entre 30 GHz et 110 GHz, la longueur d'onde correspondante est inférieure à 1 cm. Or, les commutateurs sont formés à la seconde surface de la deuxième carte de circuit imprimé, dans la zone de séparation. La formation des commutateurs devient donc problématique en raison des dimensions réduites de l'antenne de transmission. Les commutateurs, disposés à l'intérieur d'un boîtier (« *package* » en langue anglaise), et reportés à la seconde surface de la deuxième carte de circuit imprimé, sont alors susceptibles de dégrader significativement les performances de la cellule élémentaire. En effet, le boîtier de chaque commutateur tend à perturber l'environnement proche des première et deuxième surfaces de rayonnement, et par là-même affecte le diagramme de rayonnement de l'antenne de transmission. En outre, des connexions électriques sont présentes entre le boîtier et l'antenne de transmission afin de rendre fonctionnel le commutateur correspondant. Ces connexions électriques complexifient l'intégration des commutateurs, en occupant un espace non négligeable dans la zone de séparation, qui est de taille réduite.

Exposé de l'invention

[0009] Ainsi, la présente invention vise à remédier en tout ou partie aux inconvénients précités, et concerne à cet effet une cellule élémentaire d'un réseau transmetteur pour une antenne reconfigurable à une fréquence de fonctionnement, de préférence comprise entre 30 GHz et 110 GHz, la cellule élémentaire comportant :

- une antenne de réception, planaire, destinée à recevoir une onde incidente ;
- une antenne de transmission, planaire, destinée à transmettre l'onde incidente avec un déphasage, et

comprenant des première et deuxième surfaces de rayonnement séparées entre elles par une zone de séparation de manière à être électriquement isolées ;

- 5 - un circuit de déphasage configuré pour introduire le déphasage, et comprenant des commutateurs présentant chacun un état passant, respectivement bloqué, dans lequel le commutateur correspondant autorise, respectivement bloque, une circulation d'un courant entre les première et deuxième surfaces de rayonnement de l'antenne de transmission ;
- 10 - un plan de masse de part et d'autre duquel l'antenne de réception et l'antenne de transmission sont disposées ;
- 15 - une première carte de circuit imprimé comprenant une première surface munie de l'antenne de réception, et une seconde surface opposée munie du plan de masse ;

- 20 la cellule élémentaire étant remarquable en ce qu'elle comporte une tranche d'un matériau semi-conducteur, électriquement isolée du plan de masse, et comprenant une première surface munie des première et deuxième surfaces de rayonnement de l'antenne de transmission,
- 25 et en ce que les commutateurs sont formés à la première surface de la tranche, dans la zone de séparation, de manière monolithique avec l'antenne de transmission.

Définitions

- 30 **[0010]** Le terme « tranche » (*wafer* en langue anglaise) désigne une partie découpée d'un lingot d'un matériau semi-conducteur, classiquement un disque, utilisé comme matériau de base pour former des composants, en l'espèce des commutateurs.
- 35 **[0011]** Par « semi-conducteur », on entend que le matériau présente une conductivité électrique à 300 K comprise entre 10^{-8} et 10^3 S/cm.

- [0012]** Par « monolithique », on entend que l'antenne de transmission et les commutateurs partagent un unique substrat, en l'espèce la tranche. L'antenne de transmission et les commutateurs sont réalisés conjointement lors du même procédé de fabrication.
- 40 **[0013]** Ainsi, une telle cellule élémentaire selon l'invention permet de faciliter l'intégration des commutateurs dans la zone de séparation, malgré les dimensions restreintes de l'antenne de transmission, lorsque la fréquence de fonctionnement est comprise entre 30 GHz et 110 GHz. En effet, les commutateurs sont formés sur la tranche, de manière monolithique avec l'antenne de transmission. Les commutateurs ne sont donc pas reportés sur une carte de circuit imprimé (PCB pour « *Printed Circuit Board* » en langue anglaise) contrairement à l'état de la technique, ce qui conduit à une absence de boîtier et de connexions électriques entre le boîtier et l'antenne de transmission, sources de dégradation des performances de la cellule élémentaire.
- 45 **[0014]** En outre, l'antenne de réception et l'antenne de

transmission sont des antennes planaires (« *patch* » en langue anglaise). L'antenne de réception est formée à la première surface de la première carte de circuit imprimé, tandis que l'antenne de transmission est formée à la première surface de la tranche. Ainsi, une telle cellule élémentaire selon l'invention utilise une intégration hybride « PCB/wafer » pour les antennes de réception/transmission avec technologie planaire, ce qui est favorable à une production industrielle.

[0015] Avantageusement, la cellule élémentaire comporte une deuxième carte de circuit imprimé comprenant une première surface assemblée sur le plan de masse, et une seconde surface opposée, et la tranche est assemblée à la seconde surface de la deuxième carte.

[0016] Dans un mode de réalisation, la première surface de la tranche est assemblée à la seconde surface de la deuxième carte. Dans une variante de réalisation, la tranche comprend une seconde surface opposée à la première surface, et la seconde surface de la tranche est assemblée à la seconde surface de la deuxième carte.

[0017] Avantageusement, la cellule élémentaire comporte un substrat d'un matériau diélectrique assemblé à la seconde surface de la deuxième carte, et le substrat comporte une cavité conformée pour recevoir la tranche.

[0018] Par « diélectrique », on entend que le matériau présente une conductivité électrique à 300 K inférieure à 10^{-8} S/cm.

[0019] Ainsi, la cavité du substrat permet un bon alignement de la tranche relativement à la deuxième carte de circuit imprimé.

[0020] Avantageusement, le circuit de déphasage comporte un premier ensemble de pistes électriquement conductrices, agencé à la seconde surface de la deuxième carte pour polariser les commutateurs.

[0021] Les pistes sont réalisées dans un matériau électriquement conducteur. Par « électriquement conducteur », on entend que le matériau présente une conductivité électrique à 300 K supérieure à 10^3 S/cm. Le matériau électriquement conducteur est de préférence un métal, plus préférentiellement le cuivre.

[0022] Ainsi, une telle deuxième carte de circuit imprimé autorise une polarisation des commutateurs avec un encombrement minimal, et sans perturber le diagramme de rayonnement de l'antenne de transmission.

[0023] Avantageusement, le circuit de déphasage comprend :

- un second ensemble de pistes électriquement conductrices, agencé à la première surface de la deuxième carte pour polariser les commutateurs,
- des trous d'interconnexion ménagés dans la deuxième carte pour relier les premier et second ensembles de pistes électriquement conductrices.

[0024] Ainsi, une telle deuxième carte de circuit imprimé permet d'augmenter le nombre de lignes de polarisation disponibles avec un encombrement minimal, et sans perturber le diagramme de rayonnement de l'an-

tenne de transmission. Les trous d'interconnexion (« *vias* » en langue anglaise) assurent la connexion électrique entre les premier et second ensembles de pistes électriquement conductrices.

5 [0025] Avantageusement, la seconde surface de la deuxième carte comporte des plots de contact, et la tranche comporte des billes de brasage brasées sur les plots de contact de manière à assembler la tranche à la deuxième carte.

10 [0026] Ainsi, les plots de contact (« *bump contact* » en langue anglaise) et les billes de brasage assurent un assemblage plus robuste qu'un câblage par fil (« *wire bonding* » en langue anglaise), et avec moins de perturbations électromagnétiques.

15 [0027] Avantageusement, les plots de contact sont électriquement connectés au premier ensemble de pistes électriquement conductrices, et les commutateurs sont électriquement connectés aux billes de brasage.

[0028] Ainsi, on obtient une connexion électrique verticale, peu encombrante, entre les commutateurs et les lignes de polarisation.

[0029] Avantageusement, la seconde surface de la deuxième carte comporte au moins une cavité ménagée en regard de l'antenne de transmission.

25 [0030] Ainsi, de telles cavités permettent de réduire la constante diélectrique effective vue par l'antenne de transmission.

[0031] Selon une forme d'exécution, chaque commutateur est un microsystème électromécanique comportant :

- une électrode d'actionnement fixe, formée à la première surface de la tranche ;
- une membrane, formée à la première surface de rayonnement de l'antenne de transmission, et mobile entre :

une première position, correspondant à l'état passant, dans laquelle la membrane est en contact avec la seconde surface de rayonnement de l'antenne de transmission ; et

une seconde position, correspondant à l'état bloqué, dans laquelle la membrane est située à distance de la seconde surface de rayonnement de l'antenne de transmission.

[0032] Dans la présente invention, le terme « microsystème électromécanique » (MEMS pour « *Micro Electro-Mechanical Systems* » couvre également un nanosystème électromécanique (NEMS pour « *Nano Electro-Mechanical Systems* »).

[0033] Avantageusement, la cellule élémentaire comporte une couche d'encapsulation agencée pour encapsuler chaque microsystème électromécanique, la couche d'encapsulation étant formée de manière monolithique avec le microsystème électromécanique correspondant.

[0034] Ainsi, une telle couche d'encapsulation permet

d'améliorer la fiabilité du microsystème électromécanique correspondant sans perturbation importante du diagramme de rayonnement de l'antenne de transmission.

[0035] Selon une variante d'exécution, chaque commutateur comporte :

- un élément électriquement conducteur comprenant une première partie formée à la première surface de la tranche, en contact avec la première surface de rayonnement de l'antenne de transmission, et une seconde partie s'étendant en regard de la deuxième surface de rayonnement de l'antenne de transmission ;
- une couche d'un matériau à changement de phase, agencée entre la deuxième surface de rayonnement de l'antenne de transmission et la seconde partie de l'élément électriquement conducteur, le matériau à changement de phase présentant une phase cristalline correspondant à l'état passant, et une phase amorphe correspondant à l'état bloqué.

[0036] Par « électriquement conducteur », on entend que l'élément présente une conductivité électrique à 300 K supérieure à 10^3 S/cm.

[0037] Ainsi, de tels commutateurs sont particulièrement compacts relativement à des MEMS.

[0038] Avantageusement, le matériau à changement de phase est sélectionné dans le groupe comportant Ge-Te, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$.

[0039] Ainsi, de tels alliages chalcogènes sont des matériaux à changement de phase pouvant être utilisés comme mémoire.

[0040] Avantageusement, la tranche présente une résistivité supérieure ou égale à $2000 \Omega \cdot \text{cm}$.

[0041] Ainsi, une telle résistivité permet de réduire les pertes diélectriques relativement à un substrat standard pour les applications radiofréquence (RF).

[0042] Avantageusement, le matériau semi-conducteur de la tranche est à base de silicium.

[0043] La présente invention concerne également une antenne reconfigurable à une fréquence de fonctionnement, de préférence comprise entre 30 GHz et 110 GHz, comportant un réseau transmetteur comprenant une pluralité de cellules élémentaires conformes à l'invention.

Brève description des dessins

[0044] D'autres caractéristiques et avantages apparaîtront dans la description qui va suivre de différents modes de réalisation de l'invention, donnés à titre d'exemples non limitatifs, en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique d'une antenne reconfigurable à réseau transmetteur,
- les figures 2a et 2b sont des vues schématiques en coupe transversale d'une cellule élémentaire selon un premier mode de réalisation,

- les figures 3 et 4 sont des vues schématiques en coupe transversale illustrant deux formes d'exécution de la cellule élémentaire selon le premier mode de réalisation,

- 5 - les figures 5a et 5b sont des vues schématiques en coupe transversale d'une cellule élémentaire selon un deuxième mode de réalisation,

- la figure 6 est une vue schématique partielle, en transparence, d'une cellule élémentaire selon l'invention illustrant l'antenne de transmission,

- 10 - la figure 7 est une vue schématique partielle d'une cellule élémentaire selon l'invention illustrant l'antenne de réception,

- les figures 8a et 8b sont des vues schématiques en coupe de deux formes d'exécution de commutateurs,

- 15 - la figure 9 est une vue schématique en perspective éclatée de plusieurs cellules élémentaires selon un mode de réalisation de l'invention.

20

Exposé détaillé des modes de réalisation

[0045] Pour les différents modes de réalisation, les mêmes références seront utilisées pour des éléments identiques ou assurant la même fonction, par souci de simplification de la description. Les caractéristiques techniques décrites ci-après pour différents modes de réalisation sont à considérer isolément ou selon toute combinaison techniquement possible.

- 25

[0046] Aux figures 1 à 7, est illustrée une cellule élémentaire 1 d'un réseau transmetteur RT pour une antenne reconfigurable à une fréquence de fonctionnement, de préférence comprise entre 30 GHz et 110 GHz.

[0047] La cellule élémentaire 1 comporte :

- 30

- une antenne de réception 2, planaire, destinée à recevoir une onde incidente E_i ;

- une antenne de transmission 3, planaire, destinée à transmettre l'onde incidente E_i avec un déphasage (l'onde transmise E_t déphasée étant illustrée à la figure 1), et comprenant des première et deuxième surfaces de rayonnement 30, 31 séparées entre elles par une zone de séparation ZS (bien visible à la figure 6) de manière à être électriquement isolées, l'antenne de transmission 3 et l'antenne de réception 2 étant électriquement connectées entre elles ;

- 40

- un circuit de déphasage configuré pour introduire le déphasage, et comprenant des commutateurs 4 présentant chacun un état passant, respectivement bloqué, dans lequel le commutateur 4 correspondant autorise, respectivement bloque, une circulation d'un courant entre les première et deuxième surfaces de rayonnement 30, 31 de l'antenne de transmission 3 ;

- 45

- un plan de masse 5 de part et d'autre duquel l'antenne de réception 2 et l'antenne de transmission 3 sont disposées ;

55

- une première carte 6 de circuit imprimé comprenant une première surface 60 munie de l'antenne de réception 2, et une seconde surface opposée munie du plan de masse 5.

[0048] La cellule élémentaire 1 comporte une tranche 7 d'un matériau semi-conducteur, électriquement isolée du plan de masse 5. La tranche 7 comprend une première surface 70 munie des première et deuxième surfaces de rayonnement 30, 31 de l'antenne de transmission 3. Les commutateurs 4 sont formés à la première surface 70 de la tranche 7, dans la zone de séparation ZS, de manière monolithique avec l'antenne de transmission 3. La première surface 70 de la tranche 7 est avantageusement recouverte d'une couche diélectrique 700. La couche diélectrique 700 est préférentiellement un oxyde du matériau semi-conducteur. La tranche 7 présente avantageusement une résistivité supérieure ou égale à $2000 \Omega \cdot \text{cm}$. Le matériau semi-conducteur de la tranche 7 est préférentiellement à base de silicium. A titre d'exemple, pour une fréquence de fonctionnement de 60 GHz, la tranche 7 présente préférentiellement une épaisseur de l'ordre de $100 \mu\text{m}$.

[0049] La cellule élémentaire 1 comporte avantageusement une deuxième carte 9 de circuit imprimé comprenant une première surface 90 assemblée sur le plan de masse 5, et une seconde surface 91 opposée. La tranche 7 est assemblée à la seconde surface 91 de la deuxième carte 9. Dans un mode de réalisation, la première surface 70 de la tranche 7 est assemblée à la seconde surface 91 de la deuxième carte 9. Dans une variante de réalisation (illustrée aux figures 5a et 5b), la tranche 7 comprend une seconde surface 71 opposée à la première surface 70, et la seconde surface 71 de la tranche 7 est assemblée à la seconde surface 91 de la deuxième carte 9. La seconde surface 91 de la deuxième carte 9 comporte avantageusement au moins une cavité 911 ménagée en regard de l'antenne de transmission 3. A titre d'exemple la ou les cavités 911 présentent une largeur de l'ordre de $200 \mu\text{m}$. A titre d'exemple de réalisation, les première et deuxième cartes 6, 9 sont de type Rogers RO3003, avec une permittivité relative égale à 3. A titre d'exemple, pour une fréquence de fonctionnement de 60 GHz, la première carte 6 présente préférentiellement une épaisseur de l'ordre de $250 \mu\text{m}$, et la deuxième carte 9 présente préférentiellement une épaisseur de l'ordre de $100 \mu\text{m}$. La cellule élémentaire 1 comporte avantageusement un film de collage interposé entre les première et deuxième cartes 6, 9.

[0050] Comme illustré à la figure 1, le réseau transmetteur RT comporte au moins une source de rayonnement S, émettant de préférence dans un domaine spectral compris entre 30 GHz et 110 GHz, la ou les sources de rayonnement S irradiant un ensemble de cellules élémentaires 1.

[0051] L'antenne de réception 2 est une antenne planaire. A titre d'exemples non limitatifs, l'antenne de réception 2 peut être de type carrée, rectangulaire, à fente,

circulaire, elliptique, triangulaire, à spirales, etc. De même, lorsque l'antenne de réception 2 est une antenne à fente 20, la forme de la fente 20 peut être par exemple en U, rectangulaire, annulaire, circulaire, elliptique etc.

5 Comme illustré à la figure 7, l'antenne de réception 2 est une antenne planaire rectangulaire à fente 20 en U.

[0052] L'antenne de transmission 3 est une antenne planaire. Comme illustré à la figure 6, les première et deuxième surfaces de rayonnement 30, 31 sont disjointes. Une fente est avantageusement ménagée dans l'antenne de transmission 3 pour isoler électriquement les première et deuxième surfaces de rayonnement 30, 31. La fente définit la zone de séparation ZS. La fente est préférentiellement annulaire, à section rectangulaire. Bien entendu, d'autres formes sont envisageables pour la fente telles qu'une forme elliptique ou circulaire. Selon une variante d'exécution, l'isolation électrique des première et deuxième surfaces de rayonnement 30, 31 peut être assurée par un matériau diélectrique.

10 **[0053]** Les première et deuxième surfaces de rayonnement 30, 31 présentent avantageusement un axe de symétrie afin de ne pas dégrader la polarisation de l'onde transmise Et par l'antenne de transmission 3 en minimisant l'excitation de modes de résonance non désirés. La première surface de rayonnement 30 forme préférentiellement un anneau à section rectangulaire. La deuxième surface de rayonnement 31 forme préférentiellement une bande rectangulaire. La deuxième surface de rayonnement 31 est avantageusement circonscrite par la première surface de rayonnement 30 afin d'éviter la formation de courants parasites. Des surfaces de rayonnement additionnelles peuvent être avantageusement empilées sur les première et deuxième surfaces de rayonnement 30, 31 afin d'augmenter la bande passante de l'antenne de transmission 3.

35 **[0054]** L'antenne de réception 2 et l'antenne de transmission 3 sont avantageusement mobiles en rotation l'une par rapport à l'autre de manière à modifier la polarisation de l'onde incidente E_i . Ainsi, une rotation de l'antenne de transmission 3 de 90° relativement à l'antenne de réception 2 permet de passer, par exemple, d'une polarisation verticale de l'onde incidente E_i à une polarisation horizontale de l'onde transmise Et.

40 **[0055]** L'antenne de réception 2 et l'antenne de transmission 3 sont électriquement connectées entre elles, afin de pouvoir les alimenter et de les coupler, en partie par l'intermédiaire d'un trou d'interconnexion principal 8, de préférence central, de préférence métallique. Le trou d'interconnexion principal 8 traverse une ouverture ménagée dans le plan de masse 5. Le trou d'interconnexion principal 8 n'est pas en contact avec le plan de masse 5. A titre d'exemple, pour une fréquence de fonctionnement de 60 GHz, le trou d'interconnexion principal 8 présente de préférence un diamètre de l'ordre de $100 \mu\text{m}$.
45 Le plan de masse 5 forme un blindage électromagnétique entre l'antenne de réception 2 et l'antenne de transmission 3. Préférentiellement, l'antenne de réception 2 est électriquement connectée au plan de masse 5 par l'in-

termédiaire de trous d'interconnexion 80, de préférence métalliques. A titre d'exemple, pour une fréquence de fonctionnement de 60 GHz, les trous d'interconnexion 80 présentent de préférence un diamètre de l'ordre de 75 μm . Le trou d'interconnexion principal 8 est préférentiellement connecté à l'antenne de réception 2 par un premier point de connexion (non illustré). Le point de connexion est avantageusement situé près d'un bord de l'antenne de réception 2 de manière à ne pas affecter son rayonnement lorsque l'antenne de réception 2 est de type carrée. Le point de connexion est avantageusement situé près du centre de l'antenne de réception 2 lorsque l'antenne de réception 2 est de type à fente en U. De manière générale, la position du point de connexion varie selon la géométrie spécifique de l'antenne de réception 2 afin d'exciter le mode fondamental de résonance. La seconde surface 91 de la deuxième carte 9 comporte avantageusement des plots de contact 910, 910'. La tranche 7 comporte avantageusement des billes de brasage B, de préférence métalliques, brasées sur les plots de contact 910, 910' de manière à assembler la tranche 7 à la deuxième carte 9. Les plots de contact 910' sont avantageusement situés en périphérie de la seconde surface 91 de la deuxième carte 9 pour assurer une bonne tenue mécanique de la cellule élémentaire 1. Les plots de contact 910 assurent en outre une connexion électrique en conjugaison avec les billes de brasage B. Le trou d'interconnexion principal 8 est préférentiellement connecté à l'antenne de transmission 3 par un second point de connexion (non illustré), par l'intermédiaire d'une bille de brasage B brasée sur un plot de contact 910. Le second point de connexion est avantageusement situé près du centre de l'antenne de transmission 3 de manière à privilégier le mode fondamental de résonance.

[0056] Comme illustré à la figure 9, la cellule élémentaire 1 comporte avantageusement un substrat 10 d'un matériau diélectrique assemblé à la seconde surface 71 de la deuxième carte, et le substrat 10 comporte une cavité 100 conformée pour recevoir la tranche 7. Ainsi, la cavité 100 du substrat 10 et les plots de contact 910, 910' permettent d'obtenir un bon alignement de la tranche 7 relativement à la deuxième carte 9 de circuit imprimé.

[0057] Le circuit de déphasage comporte avantageusement un premier ensemble de pistes P1 électriquement conductrices, agencé à la seconde surface 91 de la deuxième carte 9 pour polariser les commutateurs 4, et former ainsi des moyens de commande des commutateurs 4. Les plots de contact 910 sont avantageusement électriquement connectés au premier ensemble de pistes P1 électriquement conductrices. Comme illustré à la figure 4, le circuit de déphasage comprend avantageusement :

- un second ensemble de pistes P2 électriquement conductrices, agencé à la première surface 90 de la deuxième carte 9 pour polariser les commutateurs,
- des trous d'interconnexion 92, de préférence métal-

liques, ménagés dans la deuxième carte 9 pour relier les premier et second ensembles de pistes P1, P2 électriquement conductrices.

[0058] Le circuit de déphasage comporte avantageusement des premières et deuxièmes lignes de transmission LT1, LT2 agencées à la première surface 70 de la tranche 7. Les premières lignes de transmission LT1 sont agencées pour connecter les pistes P1 aux commutateurs 4 afin de pouvoir commander les commutateurs 4. Les deuxièmes lignes de transmission LT2 sont agencées dans la zone de séparation ZS de manière à reporter la masse aux commutateurs 4. Lorsque la seconde surface 71 de la tranche 7 est assemblée à la seconde surface 91 de la deuxième carte 9, la cellule élémentaire 1 comporte avantageusement des trous d'interconnexion 72 ménagés dans la tranche 7, tels que des TSV (« *Through-silicon via* » en langue anglaise) lorsque le matériau semi-conducteur est à base de silicium. Les trous d'interconnexion 72 sont agencés pour connecter électriquement les premières et deuxièmes lignes de transmission LT1, LT2 au premier ensemble de pistes P1.

[0059] Le circuit de déphasage comporte avantageusement deux commutateurs 4 disposés de part et d'autre du second point de connexion dans la zone de séparation ZS. Les deux commutateurs 4 peuvent former deux composants indépendants ou un composant unique de type SPDT (pour « *Single Pole Double Throw* » en langue anglaise), avec une entrée et deux sorties commutées. Les commutateurs 4 sont avantageusement agencés pour joindre les première et deuxième surfaces de rayonnement 30, 31 afin d'autoriser la circulation d'un courant entre les première et deuxième surfaces de rayonnement 30, 31 dans l'état passant. La deuxième surface de rayonnement 31 présente avantageusement une superficie suffisamment petite pour éviter l'apparition de rayonnements parasites et suffisamment grande pour acheminer le courant du second point de connexion vers les commutateurs 4.

[0060] Les commutateurs 4 sont avantageusement électriquement connectés aux billes de brasage B. Les billes de brasage B présentent préférentiellement un diamètre de l'ordre de 100 μm . Les deux commutateurs 4 sont avantageusement commandés en alternance de sorte que, lorsque l'un des commutateurs 4 est dans l'état passant, l'autre commutateur 4 est dans l'état bloqué. L'onde transmise Et par l'antenne de transmission 3 peut donc être en phase avec l'onde incidente Ei ou déphasée de 180°. Les commutateurs 4 sont configurés pour exciter l'antenne de transmission 3 en phase ou en opposition de phase avec l'antenne de réception 2.

[0061] Selon une forme d'exécution illustrée à la figure 8a, chaque commutateur 4 est un microsystème électromécanique comportant :

- une électrode d'actionnement 400 fixe, formée à la première surface 70 de la tranche 7 ;

- une membrane 401, formée à la première surface de rayonnement 30 de l'antenne de transmission 3, et mobile entre :

une première position, correspondant à l'état passant, dans laquelle la membrane 401 est en contact avec la seconde surface de rayonnement 31 de l'antenne de transmission 3 ; et
une seconde position, correspondant à l'état bloqué, dans laquelle la membrane 401 est située à distance de la seconde surface de rayonnement 31 de l'antenne de transmission 3.

[0062] Le passage de l'état bloqué à l'état passant s'effectue en appliquant une différence de potentiels, préférentiellement de l'ordre de 30 V, entre l'électrode d'actionnement 400 et la membrane 401. L'électrode d'actionnement 400 est d'un matériau électriquement conducteur, préférentiellement un matériau métallique tel que Au. La membrane 401 est d'un matériau électriquement conducteur, préférentiellement un matériau métallique. La formation du microsystème électromécanique peut nécessiter l'utilisation d'une première couche sacrificielle 401a, par exemple en silicium amorphe, déposée sur l'électrode d'actionnement 400. La première couche sacrificielle 401 a est gravée localement afin de réaliser un contact électrique pour le matériau électriquement conducteur de l'électrode d'actionnement 400. La cellule élémentaire 1 comporte avantageusement une couche d'encapsulation 40 agencée pour encapsuler chaque microsystème électromécanique, la couche d'encapsulation 40 étant formée de manière monolithique avec le microsystème électromécanique correspondant. A titre d'exemple, pour ce faire, une seconde couche sacrificielle 401 b, telle qu'une résine photosensible, est déposée sur le microsystème électromécanique correspondant. Puis une couche 404 de dioxyde de silicium est déposée sur la seconde couche sacrificielle 401 b. Des orifices sont ménagés dans la couche 404 afin d'éliminer les première et seconde couches sacrificielles 401 a, 401 b. Puis ces orifices sont bouchés, par exemple avec un matériau polymère 405, préférentiellement du benzocyclobutène. La couche 404 de dioxyde de silicium et le matériau polymère 405 forment la couche d'encapsulation 40.

[0063] Selon une variante d'exécution illustrée à la figure 8b, chaque commutateur 4 comporte :

- un élément électriquement conducteur 402 comprenant une première partie 402a formée à la première surface 70 de la tranche 7, en contact avec la première surface de rayonnement 30 de l'antenne de transmission 3, et une seconde partie 402b s'étendant en regard de la deuxième surface de rayonnement 31 de l'antenne de transmission 3 ;
- une couche 403 d'un matériau à changement de phase, agencée entre la deuxième surface de rayonnement 31 de l'antenne de transmission 3 et la se-

conde partie 402b de l'élément électriquement conducteur 402, le matériau à changement de phase présentant une phase cristalline correspondant à l'état passant, et une phase amorphe correspondant à l'état bloqué. Le matériau à changement de phase est préférentiellement sélectionné dans le groupe comportant GeTe, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. Le passage réversible de l'état bloqué à l'état passant s'effectue sous l'effet d'une impulsion thermique appliquée par un pic de courant générant un effet Joule dans le matériau à changement de phase.

[0064] D'autres formes d'exécution sont envisageables pour les commutateurs 4. A titre d'exemples non limitatifs, des commutateurs 4 radiofréquence de type diodes, transistors, photodiodes, phototransistors sont possibles. Le choix d'un dispositif pour commander les commutateurs 4 dépend de la technologie choisie. A titre d'exemples, les dispositifs suivants peuvent être utilisés :

- une fibre optique pour un commutateur 4 de type photoélectrique,
- un faisceau laser généré par des moyens extérieurs et excitant un commutateur de type photoélectrique,
- une onde électromagnétique selon les principes de la télé-alimentation connus du domaine de la RFID (« *Radio Frequency Identification* » en langue anglaise).

Revendications

1. Cellule élémentaire (1) d'un réseau transmetteur (RT) pour une antenne reconfigurable à une fréquence de fonctionnement, de préférence comprise entre 30 GHz et 110 GHz, la cellule élémentaire (1) comportant :

- une antenne de réception (2), planaire, destinée à recevoir une onde incidente (E_i) ;
- une antenne de transmission (3), planaire, destinée à transmettre l'onde incidente (E_i) avec un déphasage, et comprenant des première et deuxième surfaces de rayonnement (30, 31) séparées entre elles par une zone de séparation (ZS) de manière à être électriquement isolées ;
- un circuit de déphasage configuré pour introduire le déphasage, et comprenant des commutateurs (4) présentant chacun un état passant, respectivement bloqué, dans lequel le commutateur (4) correspondant autorise, respectivement bloque, une circulation d'un courant entre les première et deuxième surfaces de rayonnement (30, 31) de l'antenne de transmission (3) ;
- un plan de masse (5) de part et d'autre duquel l'antenne de réception (2) et l'antenne de transmission (3) sont disposées ;
- une première carte (6) de circuit imprimé com-

- prenant une première surface (60) munie de l'antenne de réception (2), et une seconde surface opposée munie du plan de masse (5) ; la cellule élémentaire (1) étant **caractérisée en ce qu'elle** comporte une tranche (7) d'un matériau semi-conducteur, électriquement isolée du plan de masse (5), et comprenant une première surface (70) munie des première et deuxième surfaces de rayonnement (30, 31) de l'antenne de transmission (3), et **en ce que** les commutateurs (4) sont formés à la première surface (70) de la tranche (7), dans la zone de séparation (ZS), de manière monolithique avec l'antenne de transmission (3).
2. Cellule élémentaire (1) selon la revendication 1, **caractérisée en ce qu'elle** comporte une deuxième carte (9) de circuit imprimé comprenant une première surface (90) assemblée sur le plan de masse (5), et une seconde surface (91) opposée, et **en ce que** la tranche (7) est assemblée à la seconde surface (91) de la deuxième carte (9).
 3. Cellule élémentaire (1) selon la revendication 2, **caractérisée en ce qu'elle** comporte un substrat d'un matériau diélectrique assemblé à la seconde surface (91) de la deuxième carte (9), et **en ce que** le substrat comporte une cavité conformée pour recevoir la tranche (7).
 4. Cellule élémentaire (1) selon la revendication 2 ou 3, **caractérisée en ce que** le circuit de déphasage comporte un premier ensemble de pistes (P1) électriquement conductrices, agencé à la seconde surface (91) de la deuxième carte (9) pour polariser les commutateurs (4).
 5. Cellule élémentaire (1) selon la revendication 4, **caractérisée en ce que** le circuit de déphasage comprend :
 - un second ensemble de pistes (P2) électriquement conductrices, agencé à la première surface (90) de la deuxième carte (9) pour polariser les commutateurs (4),
 - des trous d'interconnexion (92) ménagés dans la deuxième carte (9) pour relier les premier et second ensembles de pistes (P1, P2) électriquement conductrices.
 6. Cellule élémentaire (1) selon l'une des revendications 2 à 5, **caractérisée en ce que** la seconde surface (91) de la deuxième carte (9) comporte des plots de contact (910, 910'), et **en ce que** la tranche (7) comporte des billes de brasage (B) brasées sur les plots de contact (910, 910') de manière à assembler la tranche (7) à la deuxième carte (9).
 7. Cellule élémentaire (1) selon la revendication 6 en combinaison avec la revendication 4 ou 5, **caractérisée en ce que** les plots de contact (910) sont électriquement connectés au premier ensemble de pistes (P1) électriquement conductrices, et **en ce que** les commutateurs (4) sont électriquement connectés aux billes de brasage (B).
 8. Cellule élémentaire (1) selon l'une des revendications 2 à 7, **caractérisée en ce que** la seconde surface (91) de la deuxième carte (9) comporte au moins une cavité (911) ménagée en regard de l'antenne de transmission (3).
 9. Cellule élémentaire (1) selon l'une des revendications 1 à 8, **caractérisée en ce que** chaque commutateur (4) est un microsystème électromécanique comportant :
 - une électrode d'actionnement (400) fixe, formée à la première surface (70) de la tranche (7) ;
 - une membrane (401), formée à la première surface de rayonnement (30) de l'antenne de transmission (3), et mobile entre :
 - une première position, correspondant à l'état passant, dans laquelle la membrane (401) est en contact avec la seconde surface de rayonnement (31) de l'antenne de transmission (3) ; et
 - une seconde position, correspondant à l'état bloqué, dans laquelle la membrane (401) est située à distance de la seconde surface de rayonnement (31) de l'antenne de transmission (3).
 10. Cellule élémentaire (1) selon la revendication 9, **caractérisée en ce qu'elle** comporte une couche d'encapsulation (40) agencée pour encapsuler chaque microsystème électromécanique, la couche d'encapsulation (40) étant formée de manière monolithique avec le microsystème électromécanique correspondant.
 11. Cellule élémentaire (1) selon l'une des revendications 1 à 8, **caractérisée en ce que** chaque commutateur (4) comporte :
 - un élément électriquement conducteur (402) comprenant une première partie (402a) formée à la première surface (70) de la tranche (7), en contact avec la première surface de rayonnement (30) de l'antenne de transmission (3), et une seconde partie (402b) s'étendant en regard de la deuxième surface de rayonnement (31) de l'antenne de transmission (3) ;
 - une couche (403) d'un matériau à changement de phase, agencée entre la deuxième surface

de rayonnement (31) de l'antenne de transmission (3) et la seconde partie (402b) de l'élément électriquement conducteur (402), le matériau à changement de phase présentant une phase cristalline correspondant à l'état passant, et une phase amorphe correspondant à l'état bloqué.

5

12. Cellule élémentaire (1) selon la revendication 11, **caractérisée en ce que** le matériau à changement de phase est sélectionné dans le groupe comportant GeTe, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$.
13. Cellule élémentaire (1) selon l'une des revendications 1 à 12, **caractérisée en ce que** la tranche (7) présente une résistivité supérieure ou égale à 2000 $\Omega\cdot\text{cm}$.
14. Cellule élémentaire selon l'une des revendications 1 à 13, **caractérisée en ce que** le matériau semi-conducteur de la tranche (7) est à base de silicium.
15. Antenne reconfigurable à une fréquence de fonctionnement, de préférence comprise entre 30 GHz et 110 GHz, comportant un réseau transmetteur (RT) comprenant une pluralité de cellules élémentaires (1) selon l'une des revendications 1 à 14.

10

15

20

25

30

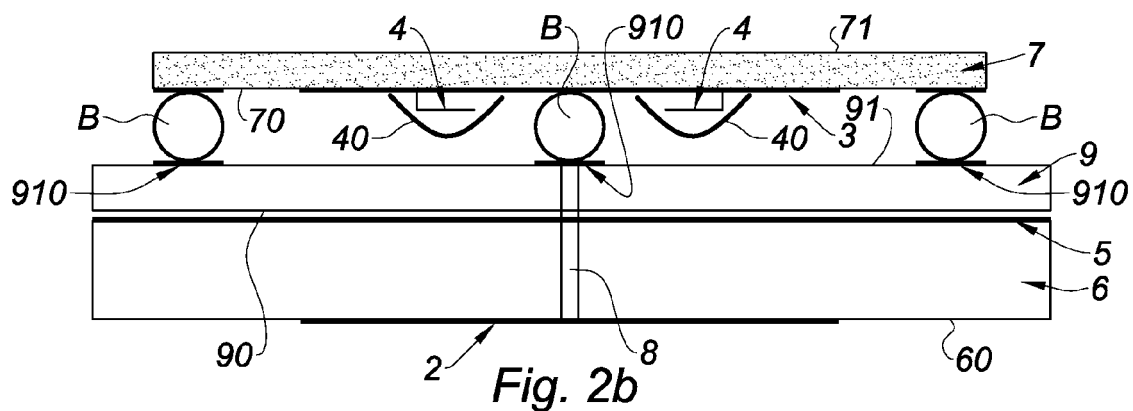
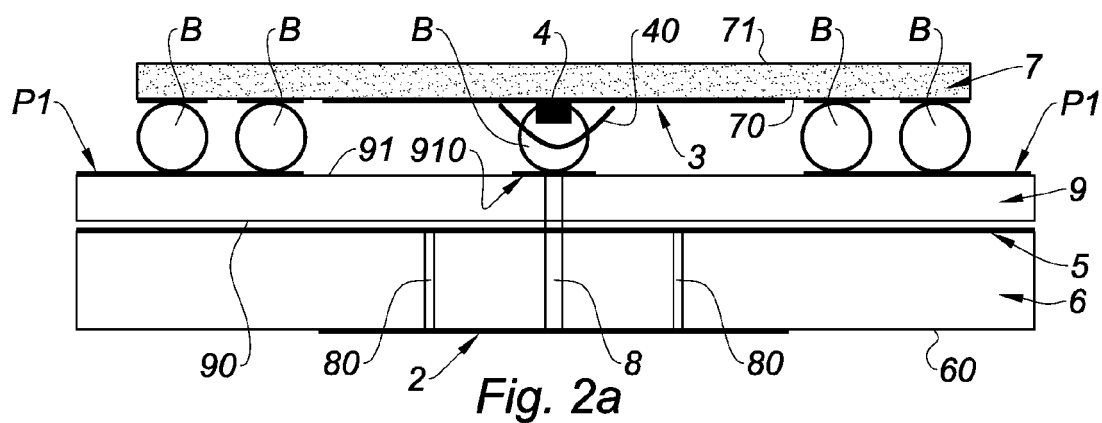
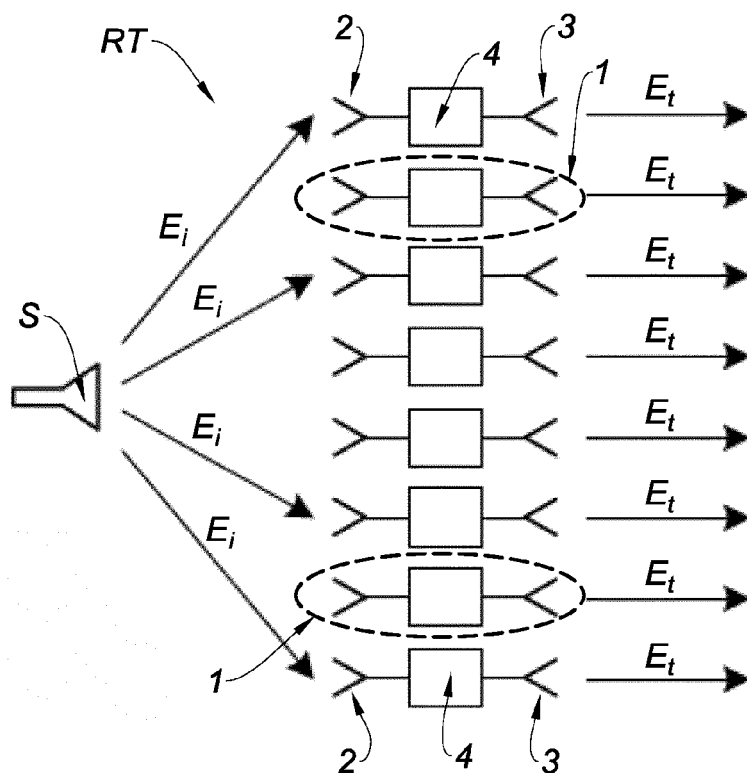
35

40

45

50

55



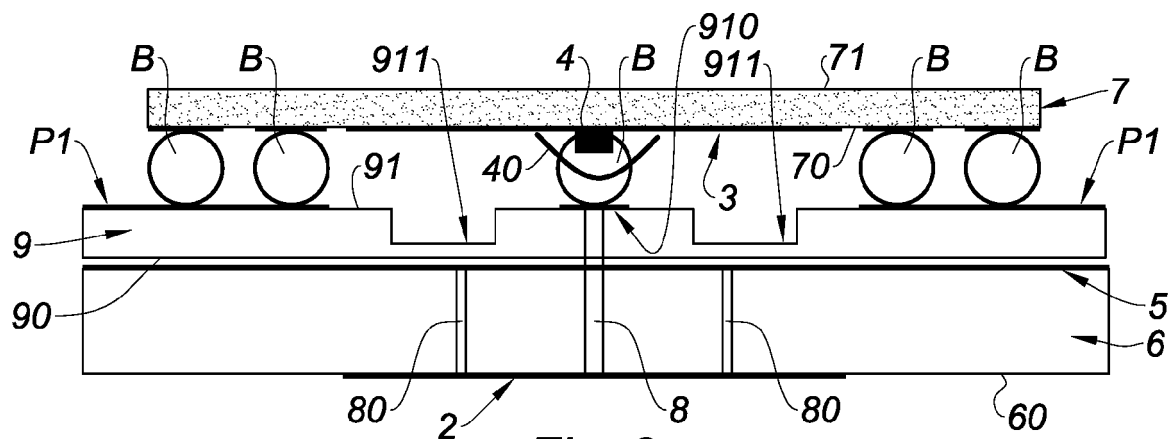


Fig. 3

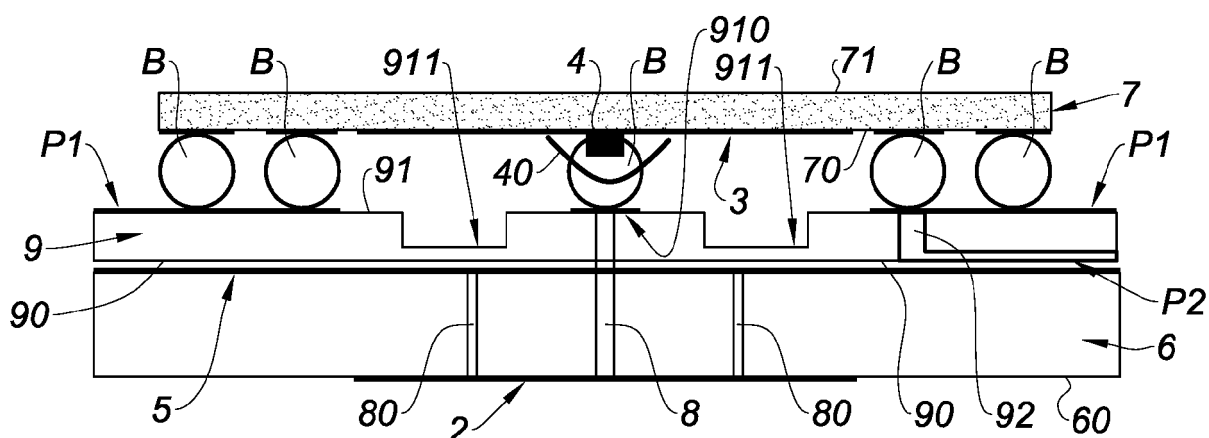


Fig. 4

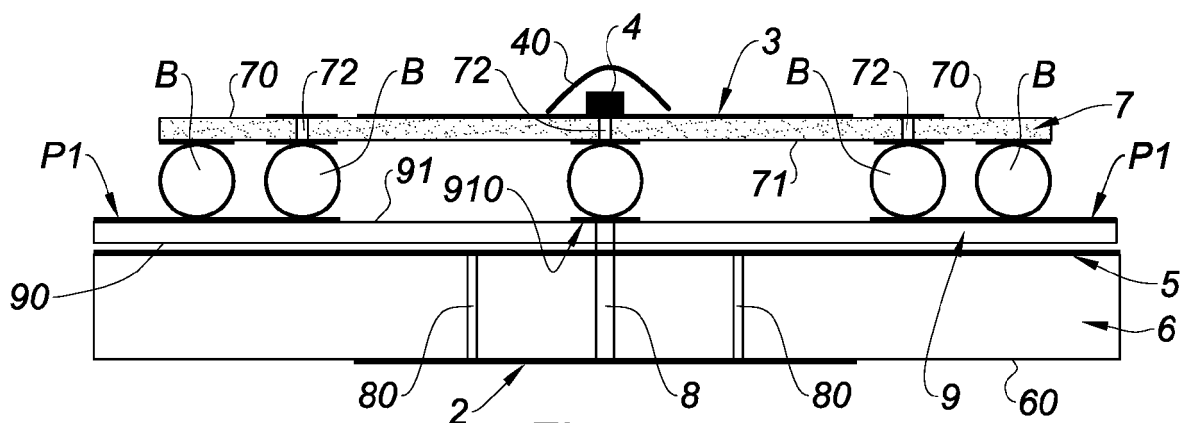


Fig. 5a

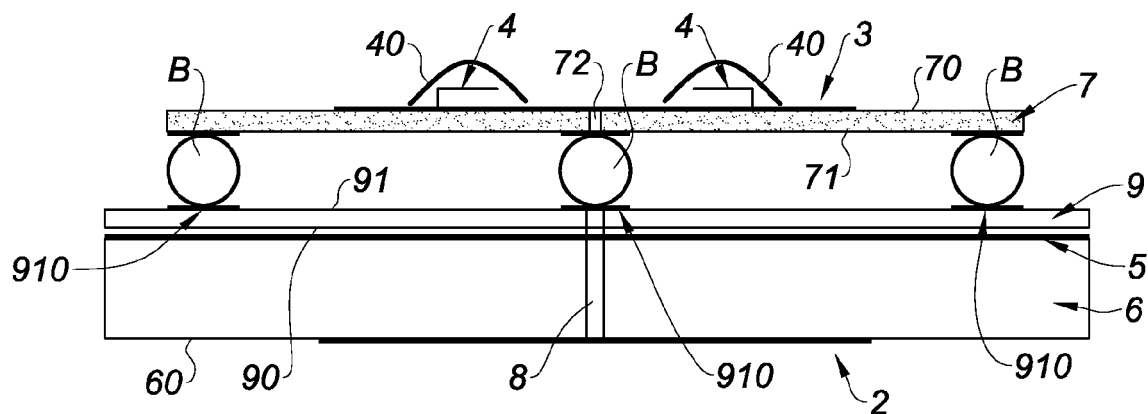


Fig. 5b

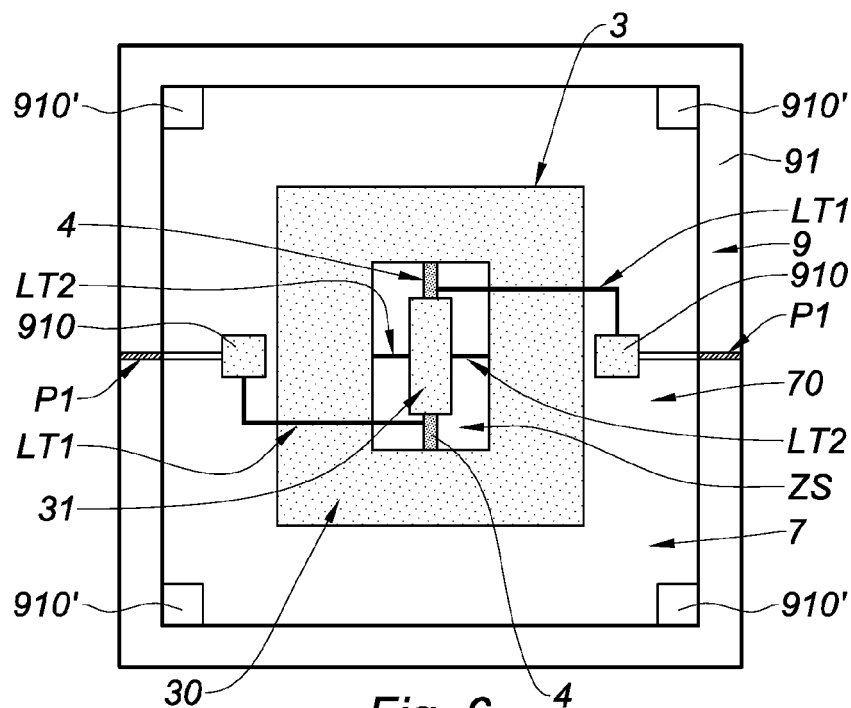


Fig. 6

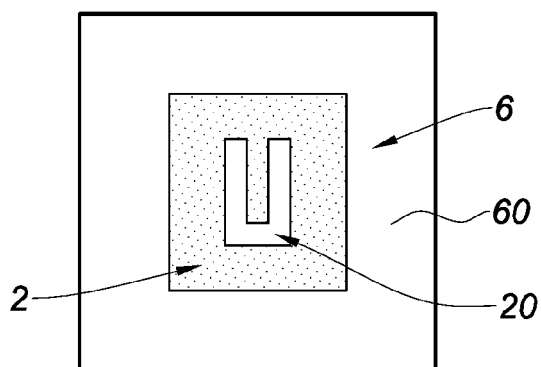


Fig. 7

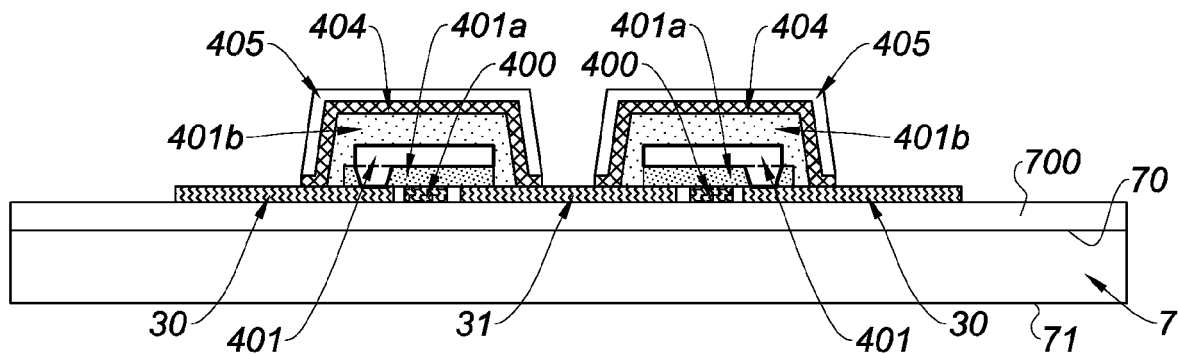


Fig. 8a

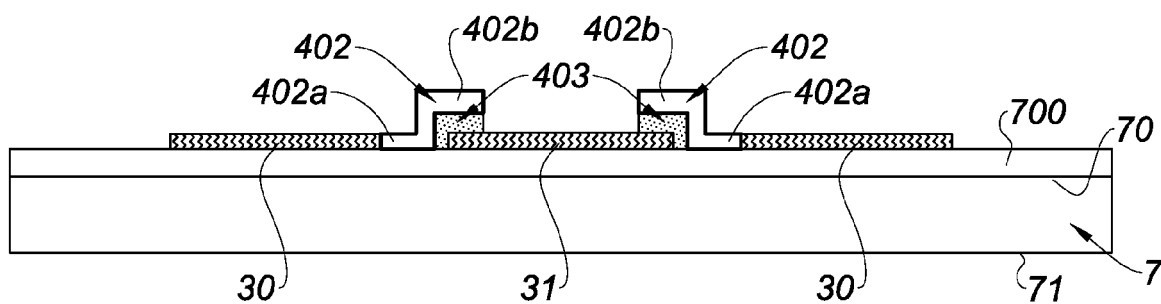


Fig. 8b

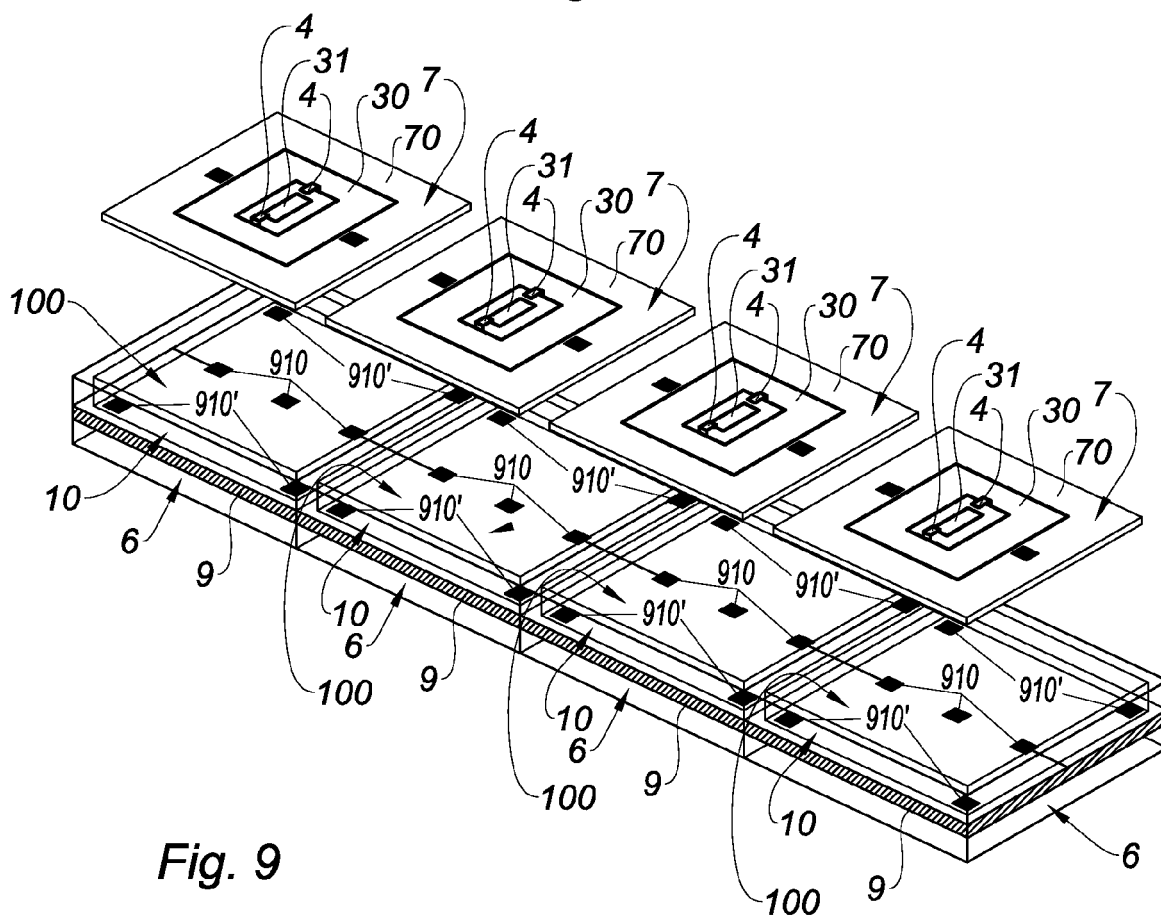


Fig. 9



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 16 18 1407

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
Y,D	WO 2012/085067 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]; DUSSOPT LAURENT [FR]; CLEMENTE ANT) 28 juin 2012 (2012-06-28) * le document en entier *	1-15	INV. H01Q1/22 H01Q3/46 H01Q21/00 H01Q23/00
Y	US 2005/035915 A1 (LIVINGSTON STAN W [US] ET AL) 17 février 2005 (2005-02-17) * alinéas [0044] - [0059], [0062]; figures 5,6,7,10,16,18 *	1-15	
A	US 2012/280380 A1 (KAMGAING TELESFOR [US]) 8 novembre 2012 (2012-11-08) * alinéas [0031] - [0034]; figures 3,4 *	1-15	
A	US 4 777 490 A (SHARMA ARVIND K [US] ET AL) 11 octobre 1988 (1988-10-11) * le document en entier *	1	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
			H01Q
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
La Haye		23 novembre 2016	Moumen, Abderrahim
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 16 18 1407

5 La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

23-11-2016

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 2012085067 A1	28-06-2012	EP 2656438 A1 FR 2969832 A1 US 2013271346 A1 WO 2012085067 A1	30-10-2013 29-06-2012 17-10-2013 28-06-2012
US 2005035915 A1	17-02-2005	AUCUN	
US 2012280380 A1	08-11-2012	CN 103782448 A EP 2705572 A2 JP 5740048 B2 JP 2014513493 A KR 20140005339 A TW 201251198 A US 2012280380 A1 WO 2012151123 A2	07-05-2014 12-03-2014 24-06-2015 29-05-2014 14-01-2014 16-12-2012 08-11-2012 08-11-2012
US 4777490 A	11-10-1988	AUCUN	

EPO FORM P0480

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

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

- WO 2012085067 A [0006]