

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
23 juillet 2009 (23.07.2009)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2009/090349 A2

- (51) Classification internationale des brevets :
H01L 23/48 (2006.01) *H01L 21/02* (2006.01)
H01L 23/49 (2006.01) *H01R 4/26* (2006.01)
H01L 21/60 (2006.01) *H01L 25/065* (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2008/001497
- (22) Date de dépôt international :
24 octobre 2008 (24.10.2008)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
0707566 26 octobre 2007 (26.10.2007) FR
- (71) Déposants (*pour tous les États désignés sauf US*) :
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE [FR/FR]; 3 rue Michel Ange, F-75016 Paris (FR). **UNIVERSITE PAUL SABATIER** [FR/FR]; 118 route de Narbonne, F-31062 Toulouse Cedex 09 (FR).
- (72) Inventeurs; et
- (75) Inventeurs/Déposants (*pour US seulement*) : **SIMON, Patrice** [FR/FR]; 3 rue Saint Gabriel, F-31400 Toulouse (FR). **TABERNA, Pierre-Louis** [FR/FR]; 9 rue des Jardins du Sauzat, F-31750 Escalquens (FR). **LEBEY, Thierry** [FR/FR]; 36 avenue des Pyrénées, F-31120 Lacroix Falgarde (FR). **CAMBRONNE, Jean Pascal** [FR/FR]; 12 Chemin du Moulin, F-31320 Mervilla (FR). **BLEY, Vincent** [FR/FR]; 22 avenue des Trobadours, F-31750 Escalquens (FR). **LUAN, Quoc Hung** [VN/FR]; D 626 Résidence Clément Ader, 118 route de Narbonne, F-31077 Toulouse (FR). **TARASCON, Jean Marie** [FR/FR]; 11 rue Ronsard, F-91540 Mennecy (FR).
- (74) Mandataire : **CABINET ORES**; 36 rue de St Pétersbourg, F-75008 Paris (FR).
- (81) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible*) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD FOR MAKING AN ELECTRICALLY CONDUCTING MECHANICAL INTERCONNECTION MEMBER

(54) Titre : PROCEDE DE FABRICATION D'UN ELEMENT D'INTERCONNEXION MECANIQUE CONDUCTEUR D'ELECTRICITE

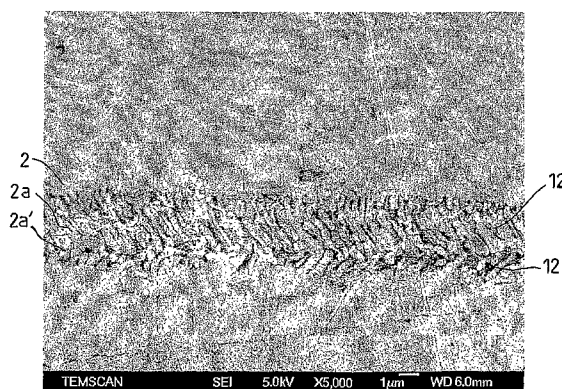


FIG. 3B

(57) Abstract: The invention relates to a method for making an electrically-conducting mechanical interconnection member (12), that comprises: a first phase of electrochemical deposition of a structure including a plurality of metal wires (2a) having a sub-micrometric diameter and protruding from the surface of a substrate (2) also made of metal; and a second phase for the controlled and partial dissolution of said wires in order to reduce the diameter thereof. The invention also relates to a method for making a mechanical and/or electric interconnection, that comprises the steps of: making two interconnection members according to the method mentioned above; and positioning the interconnection members face to face and pressing them against each other in order to carry out an interpenetration and an entanglement of the nanometric wires protruding from the surfaces of said members. The invention also relates to a three-dimensional electronic device including a stack of micro-electronic chips mechanically and electrically connected together by such interconnection members.

[Suite sur la page suivante]

WO 2009/090349 A2



IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM,

Publiée :

— sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport

(57) **Abrégé :** Procédé de fabrication d'un élément d'interconnexion mécanique conducteur d'électricité (12), comportant : une première phase de dépôt électrochimique d'une structure comportant une pluralité de fils métalliques (2a) de diamètre sub-micrométrique faisant saillie de la surface d'un substrat (2), également métallique; et une deuxième phase de dissolution contrôlée partielle desdits fils pour en réduire le diamètre. Procédé pour la réalisation d'une interconnexion mécanique et/ou électrique, comportant les étapes consistant à : fabriquer deux éléments d'interconnexion par un procédé tel que décrit ci-dessus; et disposer face à face lesdits éléments d'interconnexion et les presser l'un contre l'autre de manière à réaliser une interpénétration et un enchevêtrement des fils nanométriques faisant saillie des surfaces desdits éléments. Dispositif électronique tridimensionnel comportant un empilement de puces microélectroniques reliées entre elles mécaniquement et électriquement par de tels éléments d'interconnexion.

PROCEDE DE FABRICATION D'UN ELEMENT D'INTERCONNEXION MECANIQUE CONDUCTEUR D'ELECTRICITE

L'invention porte sur un procédé de fabrication d'un élément d'interconnexion mécanique conducteur d'électricité, ainsi que sur un procédé
5 pour la réalisation d'une interconnexion mécanique.

L'invention s'applique, en particulier, au domaine de l'électronique.

En électronique, il est constamment nécessaire de réaliser des interconnexions mécaniques conductrices d'électricité. On pense en
10 particulier à la connexion des broches d'une puce microélectronique à une piste ou plage de métallisation d'un circuit imprimé pour la réalisation d'une carte électronique.

Typiquement, ces connexions électriques et mécaniques sont réalisées par brasage ou soudure, voire par thermo-compression. Ces
15 techniques conventionnelles présentent de nombreux inconvénients. Premièrement, elles nécessitent des températures élevées, qui peuvent endommager des composants électroniques fragiles. Deuxièmement, elles ne peuvent pas être défaits facilement. Or, il est souvent important de pouvoir démonter et remonter une puce d'une carte électronique, pour la tester, la
20 réparer et/ou la remplacer.

Les problèmes d'interconnexion sont particulièrement aigus dans le cas des composants électroniques à intégration tridimensionnelle, obtenus en empilant et en interconnectant des dispositifs planaires tels que des puces ou des circuits imprimés miniaturisés. Une fois l'assemblage
25 réalisé, il est généralement impossible de le défaire sans détruire les éléments planaires qui le composent.

Le document EP1583146 divulgue un élément d'interconnexion nanostructuré, constitué par une surface métallique de laquelle font saillie des fils conducteurs de diamètre sub-micrométrique
30 (« nanofils »). Une interconnexion à la fois mécanique et électrique est réalisée en pressant lesdites surfaces l'une contre l'autre. De cette manière se réalise un enchevêtrement des nanofils, qui crée une liaison entre les

surfaces. L'interconnexion ainsi obtenue peut être défaire simplement en appliquant une force de traction suffisamment intense, puis être reconstituée par une nouvelle étape de compression.

Le document EP1583146 ne décrit de manière détaillée
5 aucun procédé permettant la fabrication d'un tel élément d'interconnexion, se bornant à citer le document antérieur US6185961.

Ce dernier document décrit un procédé pour fabriquer une pluralité de nanofils métalliques faisant saillie d'une surface, comportant : la fabrication d'une matrice poreuse en verre, le dépôt par vaporisation ou
10 pulvérisation d'une couche de métal noble sur une face de ladite matrice, la fabrication des nanofils par dépôt électrochimique dans les pores de la matrice et la dissolution de cette dernière pour libérer l'élément métallique nanostructuré ainsi obtenu. Ce procédé est très complexe et coûteux, surtout en ce qui concerne les étapes de fabrication et de métallisation de la matrice.
15 De plus, la nécessité d'une étape de dépôt par pulvérisation ou vaporisation d'un film mince conducteur électronique limite le choix des matériaux utilisables. Par exemple, il n'est pas possible de réaliser une nanostructure entièrement en cuivre.

D'autres procédés de fabrication de structures constitués par
20 une pluralité de nanofils conducteurs faisant saillie d'une surface sont connus de l'art antérieur. Cependant, ces structures ne s'avèrent pas adaptées à la réalisation d'interconnexions mécaniques par enchevêtrement des nanofils.

Par exemple, l'article de S. Fiedler et al. « Evaluation of metallic nano-lawn structures for application in microelectronic packaging »
25 décrit un procédé de fabrication d'une telle nanostructure par un procédé électrolytique globalement semblable à celui du document US 6,185,961, sauf en ce que la matrice en verre est remplacée par une membrane polymère dans laquelle des pores sont creusés par bombardement par des particules. L'inconvénient de ce procédé est que les pores ainsi obtenus (et donc les
30 nanofils qui sont déposés à l'intérieur de ces derniers) ne sont pas rectilignes et leur disposition est aléatoire. L'expérience montre qu'une interconnexion satisfaisante ne peut pas être réalisée de cette manière. Tout au plus, le

procédé permet de créer des nanostructurations sur des plages de métallisation de puces microélectroniques ou circuits imprimés, ce qui facilite leur connexion par brasage.

Le document WO2006/123049 divulgue encore un autre
5 procédé de fabrication d'une nanostructure constituée par une pluralité de nanofils métalliques faisant saillie d'une surface d'un substrat. Ce procédé prévoit, lui aussi, la formation des nanofils par dépôt électrochimique dans les pores d'une matrice sacrificielle. L'originalité du procédé réside dans
10 l'utilisation d'une matrice constituée par une membrane en matériau céramique poreux, et plus précisément en alumine. Le procédé du document WO2006/123049 est avantageux car les pores des membranes en alumine sont sensiblement rectilignes et disposés selon un réseau régulier. En outre, il n'est pas nécessaire de procéder à une métallisation préalable par vaporisation ou pulvérisation de cette membrane.

15 Les présents inventeurs, cependant, se sont rendu compte du fait que les structures ainsi obtenues ne permettent pas de réaliser des interconnexions mécaniques par interpénétration et enchevêtrement des nanofils, et cela même en réalisant une pluralité d'essais avec différentes membranes en alumine poreuse disponibles dans le commerce. En effet, le
20 document WO2006/123049 ne fait pas état d'une telle application.

Un but de l'invention est de remédier aux inconvénients précités de l'art antérieur afin de fournir un procédé simple et économique pour la réalisation d'éléments d'interconnexions mécaniques du type basé sur l'interpénétration et enchevêtrement de nanofils conducteurs.

25 Un tel but peut être atteint par un procédé de fabrication d'un élément d'interconnexion mécanique conducteur d'électricité, ledit procédé comportant les étapes consistant à :

- i. disposer, dans une cellule électrolytique, une solution électrolytique contenant un composé précurseur d'un matériau métallique ;
- 30 ii. immerger dans ladite solution un substrat conducteur dont au moins une face est revêtue d'une membrane poreuse, présentant un réseau sensiblement régulier de pores rectilignes et traversants ;

iii. disposer une électrode en regard de ladite ou de chaque membrane poreuse, mais espacée de cette dernière ;

iv. relier ledit substrat à une borne négative d'un générateur d'électricité, de manière à qu'il constitue une cathode, et ladite électrode à une borne positive dudit générateur, de manière à qu'elle constitue une anode, pour effectuer un dépôt électrolytique dudit matériau métallique sur la surface du substrat à travers les pores de ladite membrane ;

v. dissoudre ladite membrane poreuse, de manière à libérer une structure comportant une pluralité de fils de diamètre sub-micrométrique constitués dudit matériau métallique et faisant saillie de la surface dudit substrat ;

caractérisé en ce que ledit procédé comporte également une étape additionnelle vi. de dissolution contrôlée partielle desdits fils pour en réduire le diamètre de manière à augmenter la force d'adhésion qui s'exerce entre deux desdites structures, par interpénétration et enchevêtrement desdits fils, lorsqu'elles sont pressées l'une contre l'autre.

Selon des modes de réalisation particuliers de l'invention :

- Ladite membrane poreuse peut être réalisée en matériau céramique, et plus particulièrement en alumine.

- Ladite membrane poreuse peut présenter une densité de pores comprise entre 10^7 cm^{-2} et 10^{10} cm^{-2} , et de préférence de l'ordre de 10^9 cm^{-2} .

- Après ladite étape vi de dissolution contrôlée partielle, lesdits fils peuvent présenter un diamètre compris entre 5 et 300 nm, et de préférence entre 10 et 200 nm, et/ou une longueur comprise entre 200 nm et 200 μm et de préférence entre 500 nm et 100 μm .

- Egalement après ladite étape vi de dissolution contrôlée partielle, ledit élément d'interconnexion peut présenter une porosité comprise entre 0,5 et 0,9.

- Ledit matériau métallique peut être choisi parmi : Cu, Sn, Co, Fe, Pb, Ni, Cr, Au, Pd, Pt, Ag, Bi, Sb, Si, Al ou Li, ou un alliage de ces métaux. De préférence, ledit matériau métallique peut être le même matériau

qui constitue ledit substrat conducteur, de manière à obtenir une structure d'interconnexion constituée d'un seul matériau.

- Ladite étape de dissolution partielle contrôlée peut être un procédé de dissolution électrolytique.

5 - En variante, ladite étape de dissolution partielle contrôlée peut être réalisée par immersion de ladite structure dans une solution permettant l'oxydation dudit matériau métallique, ainsi que la solubilisation des produits d'oxydation de ce dernier.

10 - Ledit substrat conducteur peut être constitué par une plage de métallisation d'une puce microélectronique, ou par une piste ou plage de métallisation d'un circuit imprimé. En particulier, ledit élément d'interconnexion mécanique peut être destiné à réaliser également une connexion électrique.

Un autre objet de l'invention est un procédé pour la réalisation d'une interconnexion mécanique, comportant les étapes consistant à :

15 - fabriquer deux éléments d'interconnexion par un procédé tel que décrit ci-dessus ; et

20 - disposer face à face lesdits éléments d'interconnexion et les presser l'un contre l'autre de manière à réaliser une interpénétration et un enchevêtrement des fils nanométriques faisant saillie des surfaces desdits éléments. Avantagusement lesdits éléments d'interconnexion peuvent être pressés l'un contre l'autre par une pression comprise entre 20 MPa et 100 MPa.

25 Encore un autre objet de l'invention est un procédé de fabrication d'un dispositif microélectronique tridimensionnel constitué par un empilement d'une pluralité de puces microélectroniques reliées entre elles mécaniquement et électriquement, caractérisé en ce qu'au moins l'interconnexion mécanique entre lesdites puces est réalisée conformément à au procédé décrit ci-dessus.

30 D'une manière particulièrement avantageuse, au moins certains des éléments d'interconnexion mécanique reliant entre elles lesdites

puces microélectroniques peuvent former des canaux étanches pour la circulation d'un fluide caloporteur.

Encore un autre objet de l'invention est un dispositif électronique tridimensionnel comportant un empilement de puces microélectroniques reliées entre elles mécaniquement et électriquement, caractérisé en ce que des puces adjacentes dudit empilement présentent, sur leurs surfaces opposées, des éléments d'interconnexion se faisant face, comportant des plages de métallisation et une pluralité de fils de diamètre sub-micrométrique faisant saillie de ces dernières, et en ce que les puces sont reliées entre elles par interpénétration et enchevêtrement des fils desdits éléments d'interconnexion.

Selon des modes de réalisation particuliers du dispositif de l'invention :

- La densité desdits fils de diamètre sub-micrométrique peut être comprise entre 10^7 cm^{-2} et 10^{10} cm^{-2} , et de préférence de l'ordre de 10^9 cm^{-2} .

- Lesdits fils peuvent présenter un diamètre compris entre 5 et 300 nm, et de préférence entre 10 et 200 nm, et/ou une longueur comprise entre 200 nm et 200 μm , et de préférence entre 500 nm et 100 μm .

- Ledit élément d'interconnexion peut présenter une porosité comprise entre 0,5 et 0,9.

- Lesdits fils de diamètre sub-micrométriques peuvent être réalisés en un matériau métallique choisi parmi : Cu, Sn, Co, Fe, Pb, Ni, Cr, Au, Pd, Pt, Ag, Bi, Sb, Si, Al ou Li, ou un alliage de ces métaux.

- Avantagement, au moins certains desdits éléments d'interconnexion peuvent se présenter sous la forme de bandes parallèles, non nécessairement rectilignes, qui traversent la puce d'un côté à un autre, de manière à constituer des parois étanches délimitant au moins un tube pour la circulation d'un fluide caloporteur.

D'autres caractéristiques, détails et avantages de l'invention ressortiront à la lecture de la description faite en référence aux dessins annexés donnés à titre d'exemple et qui représentent, respectivement :

- La figure 1, les étapes i. à v. d'un procédé selon l'invention ;

- La figure 2, l'étape vi. de ce même procédé ;
 - La figure 3A, une vue du haut, au microscope électronique, d'un élément d'interconnexion réalisé conformément au procédé de l'invention
- 5 - La figure 3B, une vue latérale, au microscope électronique à balayage, d'une interconnexion électrique et mécanique réalisée conformément au procédé de l'invention ; et
- Les figures 4A et 4B, un exemple particulier d'une structure microélectronique utilisant des interconnexions mécaniques pouvant
- 10 être obtenues par le procédé de l'invention.

Le procédé de fabrication d'un élément d'interconnexion mécanique conducteur d'électricité selon l'invention se compose de deux phases. La première, qui est représentée de manière schématique sur la figure 1, est décrite en détail par le document WO2006/123049.

15 Elle comporte les étapes consistant à :

Etape i : disposer, dans une cellule électrolytique CE, une solution électrolytique 1 d'un composé précurseur d'un matériau métallique. Typiquement, il pourra s'agir d'une solution aqueuse ou organique d'un ou plusieurs sels métalliques. Le ou les métaux peuvent être choisis en particulier parmi les suivants : Cu, Sn, Co, Fe, Pb, Ni, Cr, Au, Pd, Pt, Ag, Bi, Sb, Al, Si, ou Li. Si on utilise des sels de métaux différents, on veillera à ce que lesdits métaux puissent se combiner en un alliage. A titre d'exemple spécifique, la solution électrolytique peut être une solution aqueuse de CuSO_4 (100 g/l), $(\text{NaH}_4)_2\text{SO}_4$ (20 g/l) et diéthylènetrétamine (80 g/l).

20

Etape ii : immerger dans ladite solution 1 un substrat conducteur 2 dont au moins une face est revêtue d'une membrane poreuse 3, présentant un réseau sensiblement régulier de pores rectilignes et traversants. Le substrat conducteur 2 peut être constitué par une plage de métallisation d'une puce microélectronique « nue », ou par une piste d'un circuit intégré. Quant à la membrane, elle est de préférence en alumine, elle a une épaisseur de quelques centaines de nanomètres à quelques dizaines de μm et présente $10^7 - 10^{10}$ pores (10^9 étant une valeur préférée)

25

30

substantiellement cylindriques, d'un diamètre approximativement uniforme de 50 – 500 nm et repartis selon un réseau hexagonal régulier. Une membrane de ce type est commercialisée sous la dénomination « Anodisc » par la société Whatman.

5 En variante, des membranes constituées par d'autres matériaux peuvent être utilisées ; ce qui importe le plus, est qu'elles présentent un réseau sensiblement régulier de pores rectilignes et traversants. En l'état actuel de la technique, les meilleurs résultats sont obtenus avec des membranes en alumine. D'autres matériaux céramiques
10 tels que l'oxyde de titane TiO_2 constituent des alternatives acceptables, bien que moins satisfaisantes.

Etape iii : disposer une électrode 5 en regard de ladite ou de chaque membrane poreuse, mais espacée de cette dernière. Cette électrode peut, par exemple, être constituée par une feuille de cuivre, espacée de la
15 membrane 3 par une feuille cellulosique perméable 4.

Etape iv : relier ledit substrat 2 à une borne négative d'un générateur d'électricité 6, de manière à qu'il constitue une cathode, et ladite électrode 5 à une borne positive dudit générateur 6, de manière à qu'elle constitue une anode, pour effectuer un dépôt électrolytique dudit matériau
20 métallique sur la surface du substrat à travers les pores de ladite membrane. Le dépôt peut être effectué en continu ou de manière impulsionnelle. Par exemple, un protocole de mise en œuvre du procédé peut prévoir la répétition, pendant 30 minutes, d'une séquence comportant l'application d'un courant de 1 mA/cm² pendant 250 ms et d'un courant de 20 mA/cm² pendant
25 50 ms.

Etape v : dissoudre ladite membrane poreuse 3, par exemple par immersion dans une solution 1M de soude à 80°C pendant 30s, suivie par un rinçage pendant 10 s dans une solution aqueuse de H_2SO_4 (1M) et $CuSO_4$ (1M).

30 La dissolution de la membrane 3 libère une structure 10 en forme de « brosse », constituée par une pluralité de fils métalliques de diamètre sub-micrométrique (« nanofils ») 2a faisant saillie de la surface dudit

substrat 2. Les fils 2a constituent l'empreinte des pores de la membrane : les caractéristiques de cette dernière déterminent par conséquent le diamètre, la densité et la longueur des nanofils.

Les présents inventeurs ont réalisé plusieurs essais en utilisant différentes membranes d'alumine poreuse disponibles dans le commerce. Dans aucun cas ils n'ont réussi à réaliser une interconnexion électrique et mécanique suffisamment solide par compression de deux structures ainsi obtenues et disposées face à face.

De manière inattendue, les inventeurs se sont rendu compte qu'une interconnexion présentant des bonnes propriétés électriques et mécanique peut être obtenue si, préalablement, on amincit les nanofils par une étape ultérieure (étape vi) de dissolution contrôlée partielle. Il semblerait que la plus grande porosité des « brosses » après cette étape de dissolution partielle permet une meilleure interpénétration des nanofils et donc un contact plus intime entre les deux structures pressées l'une contre l'autre.

Cette dissolution contrôlée peut se faire par plusieurs méthodes, à savoir avec ou sans courant ou polarisation imposée. La méthode sans courant ou polarisation imposée, dite « electroless » en anglais, représentée sur la figure 2, est réalisée par simple immersion de la structure 10 dans une solution 11 permettant la dissolution contrôlée du métal constituant les nanofils. Cette solution doit permettre l'oxydation du métal ainsi que la solubilisation des produits d'oxydation de ce dernier. Par exemple, il peut s'agir d'un mélange d'un acide avec un composé plus oxydant que le métal à dissoudre. Par exemple, dans le cas de nanofils en cuivre, on peut utiliser un mélange de H_2SO_4 avec une concentration comprise entre 0,01 et 1M (de préférence 0,1 M) et de H_2O_2 avec une concentration comprise entre 0,3 et 0,003M (de préférence 0,03 M).

Une solution basique peut être utilisée en remplacement de la solution acide de l'exemple.

D'autres méthodes nécessitant l'application d'un courant ou d'un potentiel anodique permettent également une dissolution contrôlée partielle des nanofils. Parmi ces méthodes, on peut citer les polarisations

galvanostatiques, potentiostatiques, ou encore les polarisations impulsionnelles sous potentiel ou sous courant continu ou alternatif. Dans ces cas, la dissolution peut se faire dans la même solution 1 utilisée pour l'étape (iv) de dépôt.

5 L'élément d'interconnexion obtenu à l'issue de l'étape vi de dissolution contrôlée partielle présente typiquement entre 10^7 et 10^{10} fils·cm⁻² (de préférence, de l'ordre de 10^9), lesdits fils présentant un diamètre généralement compris entre 5 et 300 nm, et de préférence entre 10 et 200 nm, et une longueur généralement comprise entre 200 nm et 200 µm, et de
10 préférence entre 500 nm et 100 µm. Généralement, la longueur des fils est inférieure ou égale à l'épaisseur de la membrane.

La porosité de l'élément d'interconnexion (définie comme étant le rapport du volume des espaces vides par rapport au volume total de la « brosse ») est typiquement comprise entre 0,5 et 0,9, et typiquement de
15 l'ordre de 0,75, bien qu'une mesure précise de ce paramètre soit difficile.

La figure 3A est une vue au microscope électronique d'un élément d'interconnexion 12 réalisée par un procédé selon l'invention, comportant un substrat en cuivre 2 de la surface duquel font saillie des « nanofils » 2a, également en cuivre, ayant une longueur de l'ordre de 3µm et
20 un diamètre de l'ordre de 200 nm. La densité des nanofils F est de l'ordre de 10^9 cm⁻².

La figure 3B est une vue au microscope électronique d'une interconnexion réalisée en pressant l'un contre l'autre deux éléments d'interconnexions 12, 12' identiques, du type représenté sur la figure 3A. On
25 peut voir l'interpénétration et l'enchevêtrement des nanofils 2a, 2a', responsable de la liaison mécanique. L'interconnexion a été réalisée par application d'une pression de 50 MPa, et la force de liaison qui s'exerce entre les éléments 12, 12' est de l'ordre de 5 N/cm². Cette interconnexion peut être
30 défaits par simple traction, sans endommagement apparent des nanofils. Trois cycles de formation et défection de l'interconnexion peuvent être réalisés en succession sans que la force de liaison ne décroisse de manière appréciable.

Plus généralement, les pressions utilisées pour la formation des interconnexions peuvent être comprises entre 20 et 100 MPa, et les forces de liaison entre 3 et 10 N/cm².

Les éléments d'interconnexion de l'invention peuvent être
5 utilisés pour réaliser des assemblages électroniques à puce retournée (« flip chip »). Dans ce cas, les plages de métallisation de la puce et du circuit intégré sont utilisées comme substrats pour le dépôt électrochimique des nanofils. Par rapport aux techniques d'assemblage électronique conventionnelles, l'utilisation d'une interconnexion de ce type permet d'éviter
10 tout risque de surchauffe de la puce lors d'une étape de brasage. De plus le démontage de la puce, qui peut s'avérer nécessaire pour la tester, réparer ou remplacer, se trouve grandement facilité.

De préférence, les éléments d'interconnexion assurent aussi bien une connexion électrique que mécanique, et parfois même thermique.
15 Mais ces fonctions peuvent également être dissociées.

Une application particulièrement intéressante de l'invention est l'intégration tridimensionnelle, qui consiste à empiler des dispositifs planaires tels que des puces ou des circuits imprimés miniaturisés. Une technique d'intégration tridimensionnelle connue de l'art antérieur est décrite
20 dans le document EP0490739. Les éléments d'interconnexion de l'invention peuvent simplifier la réalisation de tels dispositifs tridimensionnels, en assurant aussi bien une liaison mécanique qu'une connexion électrique entre les différents dispositifs planaires. Un dispositif tridimensionnel fabriqué de cette manière présente l'avantage considérable d'être démontable, ce qui
25 n'est guère concevable lorsqu'on utilise les techniques de l'art antérieur.

L'intégration tridimensionnelle pose des graves problèmes de dissipation thermique ; les éléments d'interconnexion de l'invention peuvent y apporter une solution originale, comme le montre les figures 4A et 4B.

La figure 4A représente une puce microélectronique
30 destinée à faire part d'un empilement tridimensionnel de circuits intégrés. Ses surfaces supérieure – référence 21 – et inférieure – non visible – portent des éléments d'interconnexion réalisés selon le procédé de l'invention, en utilisant

des plages de métallisation en tant que substrats. On peut distinguer deux groupes d'éléments d'interconnexion 22, 22' de forme sensiblement carrée ; ces éléments d'interconnexion assurent le passage de signaux électriques et contribuent à former une liaison mécanique entre la puce 200 et les autres
5 puces (références 210 et 220 sur la figure 4B) qui seront disposées au-dessus et au-dessous d'elle. Les éléments d'interconnexion 23 et 24 se présentent sous la forme de bandes parallèles, non nécessairement rectilignes, qui traversent la puce 200 d'un côté à l'autre. Ces éléments d'interconnexion sont électriquement isolés de la puce (leur substrat est
10 constitué d'une métallisation réalisée au-dessus d'une couche isolante, par exemple en SiO_2). De même, la région 25 de la surface de la puce comprise entre les bandes 23, 24 est passivée. On peut voir sur la figure que la surface inférieure de la puce présente à son tour des éléments d'interconnexion en forme de bandes parallèles 26, 27.

15 Lorsque plusieurs puces du même type, présentant des éléments d'interconnexion correspondants, sont empilées et pressées les unes contre les autres, on obtient une structure tridimensionnelle du type représenté sur la figure 4B.

La figure 4B montre que les éléments conducteurs en forme
20 de bande 23, 24 et la région 25 qu'elles délimitent forment, avec les parties correspondantes de la puce adjacente 210, un canal ou tube 30. Les éléments d'interconnexion 23, 24 forment des parois étanches : par conséquent, il est possible de faire circuler dans ce canal (et dans tous les canaux formés aux interfaces entre les différentes puces) un fluide
25 caloporteur pour évacuer la chaleur dissipée par les circuits électroniques de la structure.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de fabrication d'un élément d'interconnexion mécanique conducteur d'électricité (12), ledit procédé comportant les étapes consistant à :

5 i. disposer, dans une cellule électrolytique (CE), une solution électrolytique (1) d'un composé précurseur d'un matériau métallique ;

ii. immerger dans ladite solution un substrat conducteur (2) dont au moins une face est revêtue d'une membrane poreuse (3), présentant un réseau sensiblement régulier de pores rectilignes et
10 traversants ;

iii. disposer une électrode (5) en regard de ladite ou de chaque membrane poreuse, mais espacée de cette dernière ;

iv. relier ledit substrat à une borne négative d'un générateur d'électricité (6), de manière à qu'il constitue une cathode, et ladite électrode à
15 une borne positive dudit générateur, de manière à qu'elle constitue une anode, pour effectuer un dépôt électrolytique dudit matériau métallique sur la surface du substrat à travers les pores de ladite membrane ;

v. dissoudre ladite membrane poreuse, de manière à libérer une structure (10) comportant une pluralité de fils (2a) de diamètre sub-
20 micrométrique constitués dudit matériau métallique et faisant saillie de la surface dudit substrat (2) ;

caractérisé en ce que ledit procédé comporte également une étape additionnelle vi. de dissolution contrôlée partielle desdits fils (2a) pour en réduire le diamètre de manière à augmenter la force d'adhésion qui
25 s'exerce entre deux desdites structures, par interpénétration et enchevêtrement desdits fils, lorsqu'elles sont pressées l'une contre l'autre.

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel ladite membrane poreuse (3) est réalisée en matériau céramique.

3. Procédé selon la revendication 2, dans lequel ladite
30 membrane poreuse (3) est réalisée en alumine.

4. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel ladite membrane poreuse (3) présente une densité de pores comprise entre 10^7 cm^{-2} et 10^{10} cm^{-2} , et de préférence de l'ordre de 10^9 cm^{-2} .

5. Procédé selon l'une des revendications précédentes dans lequel, après ladite étape vi de dissolution contrôlée partielle, lesdits fils présentent un diamètre compris entre 5 et 300 nm, et de préférence entre 10 et 200 nm.

6. Procédé selon l'une des revendications précédentes dans lequel, après ladite étape vi de dissolution contrôlée partielle, lesdits fils (2a) présentent une longueur comprise entre 200 nm et 200 μm , et de préférence entre 500 nm et 100 μm .

7. Procédé selon l'une des revendications précédentes dans lequel, après ladite étape vi de dissolution contrôlée partielle, ledit élément d'interconnexion (12) présente une porosité comprise entre 0,5 et 0,9.

8. Procédé selon l'une des revendications précédentes dans lequel ledit matériau métallique est choisi parmi : Cu, Sn, Co, Fe, Pb, Ni, Cr, Au, Pd, Pt, Ag, Bi, Sb, Al, Si ou Li, ou un alliage de ces métaux.

9. Procédé selon l'une des revendications précédentes dans lequel ledit matériau métallique est le même matériau qui constitue ledit substrat conducteur (1), de manière à obtenir une structure d'interconnexion constituée d'un seul matériau.

10. Procédé selon l'une des revendications précédentes dans lequel ladite étape de dissolution partielle contrôlée est un procédé de dissolution électrolytique.

11. Procédé selon l'une des revendications 1 à 9 dans lequel ladite étape de dissolution partielle contrôlée est réalisée par immersion de ladite structure dans une solution permettant l'oxydation dudit matériau métallique, ainsi que la solubilisation des produits d'oxydation de ce dernier.

12. Procédé selon l'une des revendications précédentes dans lequel ledit substrat conducteur (1) est constitué par une plage de métallisation d'une puce microélectronique (200).

13. Procédé selon l'une des revendications 12 ou 13 dans lequel ledit substrat conducteur (1) est constitué par une piste ou plage de métallisation d'un circuit imprimé.

5 14. Procédé selon la revendication selon l'une des revendications 12 et 13, dans lequel ledit élément d'interconnexion mécanique (12) est destiné à réaliser également une connexion électrique.

15. Procédé pour la réalisation d'une interconnexion mécanique, comportant les étapes consistant à :

10 - fabriquer deux éléments d'interconnexion (12, 12') par un procédé selon l'une des revendications précédentes ; et

- disposer face à face lesdits éléments d'interconnexion et les presser l'un contre l'autre de manière à réaliser une interpénétration et un enchevêtrement des fils nanométriques faisant saillie des surfaces desdits éléments.

15 16. Procédé selon la revendication 15, dans lequel lesdits éléments d'interconnexion (12, 12') sont pressés l'un contre l'autre par une pression comprise entre 20 MPa et 100 MPa.

20 17. Procédé de fabrication d'un dispositif microélectronique tridimensionnel constitué par un empilement d'une pluralité de puces microélectroniques (200, 210, 220) reliées entre elles mécaniquement et électriquement, caractérisé en ce qu'au moins l'interconnexion mécanique entre lesdites puces est réalisée conformément à l'une des revendications 15 et 16.

25 18. Procédé selon la revendication 17, dans lequel au moins certains (23, 24, 25, 26) des éléments d'interconnexion mécanique reliant entre elles lesdites puces microélectroniques forment des canaux (30) étanches pour la circulation d'un fluide caloporteur.

30 19. Dispositif électronique tridimensionnel comportant un empilement de puces microélectroniques (200, 210, 220) reliées entre elles mécaniquement et électriquement, caractérisé en ce que des puces adjacentes dudit empilement présentent, sur leurs surfaces opposées, des éléments d'interconnexion (22, 22', 23, 24, 25, 26) se faisant face, comportant

des plages de métallisation et une pluralité de fils de diamètre sub-micrométrique faisant saillie de ces dernières, et en ce que les puces sont reliées entre elles par interpénétration et enchevêtrement des fils desdits éléments d'interconnexion.

5 20. Dispositif électronique tridimensionnel selon la revendication 19, dans lequel la densité desdits fils de diamètre sub-micrométrique est comprise entre 10^7 cm^{-2} et 10^{10} cm^{-2} , et de préférence de l'ordre de 10^9 cm^{-2} .

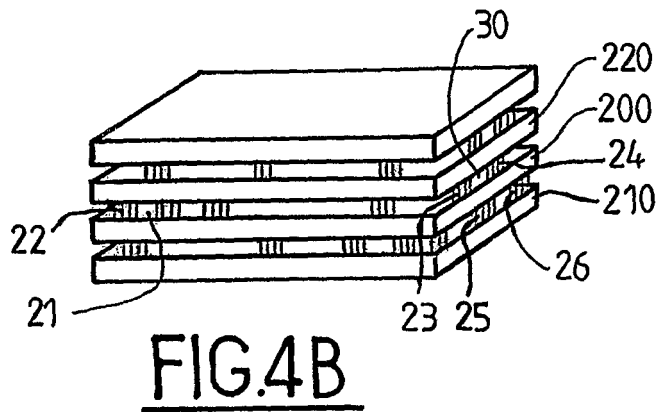
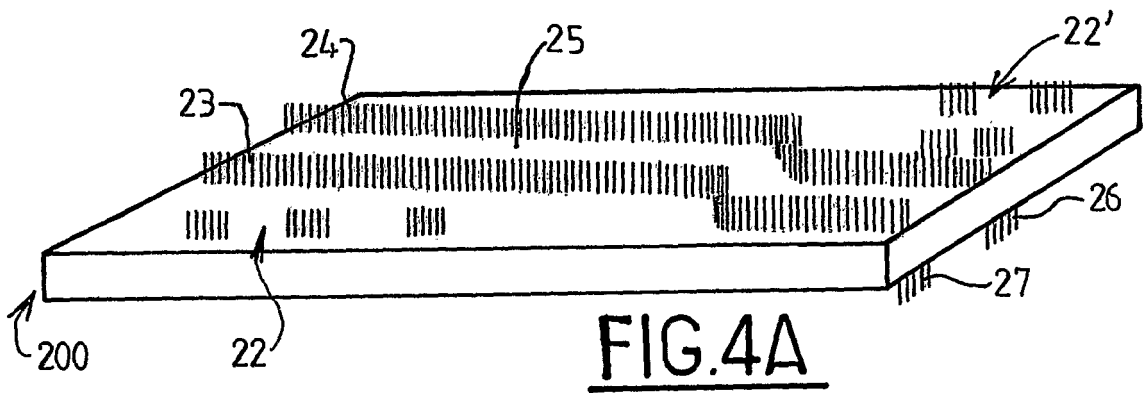
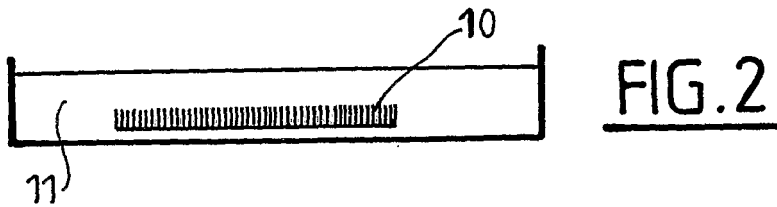
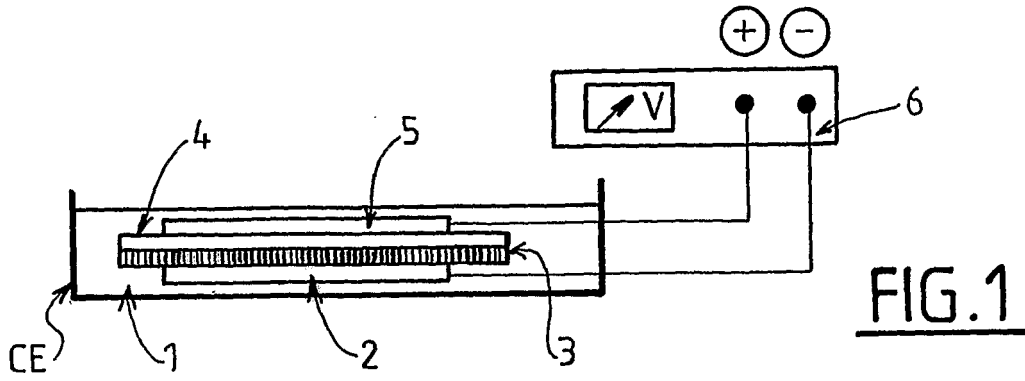
10 21. Dispositif électronique tridimensionnel selon la revendication 19 ou 20, dans lequel lesdits fils présentent un diamètre compris entre 5 et 300 nm, et de préférence entre 10 et 200 nm.

22. Dispositif électronique tridimensionnel selon l'une des revendications 19 à 21, dans lequel lesdits fils présentent une longueur comprise entre 200 nm et 200 μm , et de préférence entre 500 nm et 100 μm .

15 23. Dispositif électronique tridimensionnel selon l'une des revendications 19 à 22, dans lequel ledit élément d'interconnexion (12) présente une porosité comprise entre 0,5 et 0,9.

20 24. Dispositif électronique tridimensionnel selon l'une des revendications 19 à 23, dans lequel lesdits fils de diamètre sub-micrométriques sont réalisés en un matériau métallique choisi parmi : Cu, Sn, Co, Fe, Pb, Ni, Cr, Au, Pd, Pt, Ag, Bi, Sb, Al, Si ou Li, ou un alliage de ces métaux.

25 25. Dispositif électronique tridimensionnel selon l'une des revendications 19 à 24, dans lequel au moins certains desdits éléments d'interconnexion (23, 24, 25, 26) se présentent sous la forme de bandes parallèles, non nécessairement rectilignes, qui traversent la puce d'un côté à un autre, de manière à constituer des parois étanches délimitant au moins un tube (30) pour la circulation d'un fluide caloporteur.



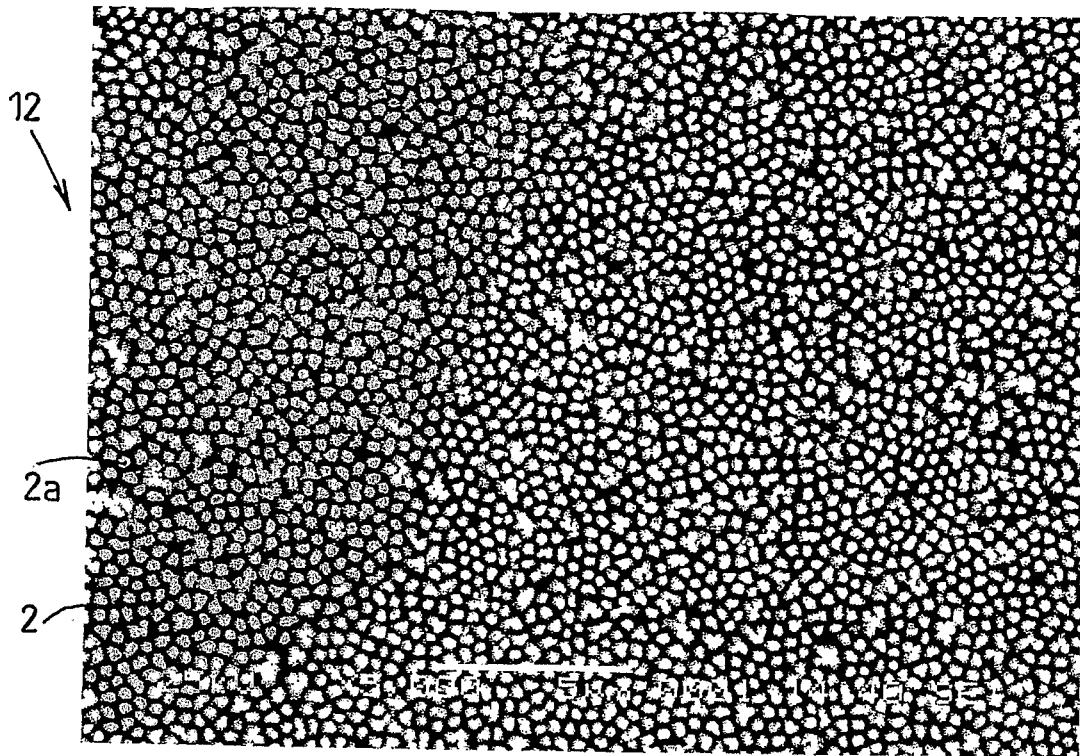


FIG. 3A

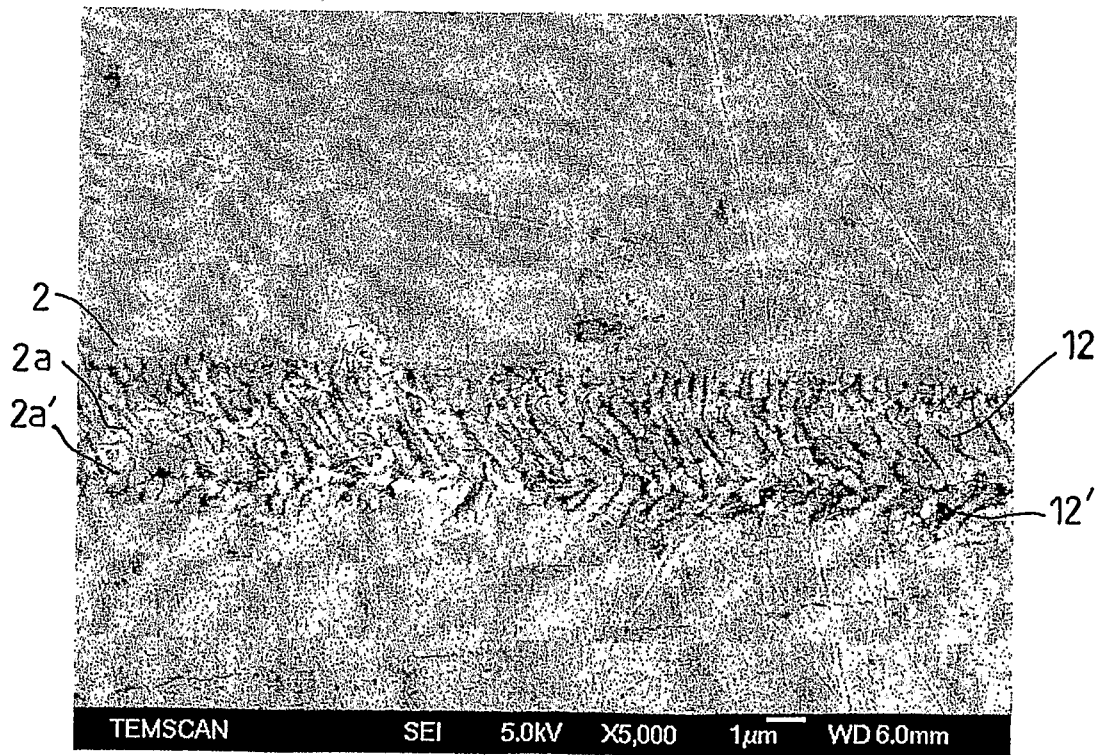


FIG. 3B