



(51) Classification internationale des brevets :

G11C 11/56 (2006.01) G11C 11/38 (2006.01)  
G11C 11/22 (2006.01) G11C 27/00 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/EP2010/058149

(22) Date de dépôt international :

10 juin 2010 (10.06.2010)

(25) Langue de dépôt :

français

(26) Langue de publication :

français

(30) Données relatives à la priorité :

0902845 11 juin 2009 (11.06.2009) FR

(71) Déposants (pour tous les États désignés sauf US) :

THALES [FR/FR]; 45 rue de Villiers, F-92200 Neuilly sur Seine (FR). CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE [FR/FR]; 3, rue Michel Ange, F-75016 Paris (FR). UNIVERSITE PARIS SUD [FR/FR]; 15, avenue Georges Clémenceau, F-91405 Orsay Cedex (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : BIBES, Manuel [FR/FR]; 29 rue Boussingault, F-75013 Paris (FR). BARTHELEMY, Agnès [FR/FR]; 8 rue du Grand

Cèdre, F-91640 Janvry (FR). GROLLIER, Julie [FR/FR]; 4 rue de Rungis, F-75013 Paris (FR). MAGE, Jean-Claude [FR/FR]; 7 rue de la Martinière, F-91120 Palaiseau (FR).

(74) Mandataires : ESSELIN, Sophie et al.; Marks & Clerk France, Immeuble VISIUM, 22 avenue Aristide Briand, F-94117 Arcueil Cedex (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, CL, 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, 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, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : FERROELECTRIC DEVICE WITH ADJUSTABLE RESISTANCE

(54) Titre : DISPOSITIF FERROÉLECTRIQUE À RÉSISTANCE AJUSTABLE

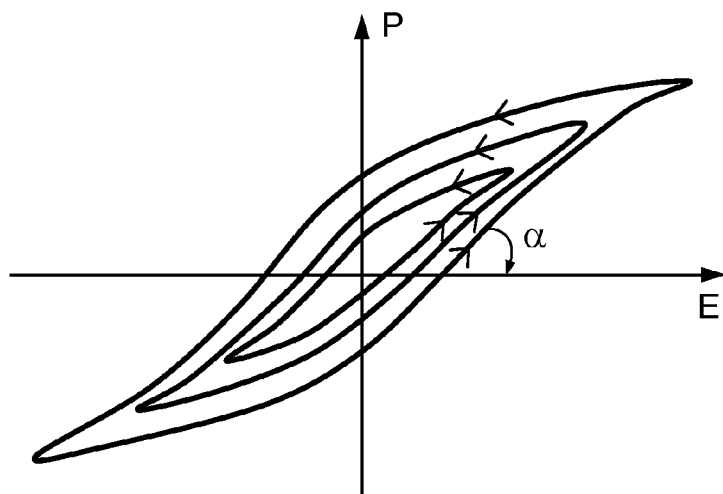


FIG.3a

(57) Abstract : The invention relates to a device (1) with adjustable resistance in which the resistance can have more than two values, said device comprising a stack of two conducting electrodes (3, 4) separated by an insulating layer (5), characterised in that the stack of electrodes (3, 4) separated by the insulating layer (5) forms a tunnel junction (2) and in that said insulating layer is made of a ferroelectric material in which the polarisation according to the electrical field generated in the material is defined by a plurality of interleaved and contiguous hysteresis loops, the resistance of the device depending on the polarisation of the ferroelectric material.

(57) Abrégé : Dispositif (1) à résistance ajustable dont la résistance peut prendre plus de deux valeurs, ledit dispositif comportant un empilement de deux électrodes conductrices (3, 4) séparées par une couche isolante (5) caractérisé en ce que l'empilement des électrodes (3, 4) séparées par la couche isolante (5) forme une jonction à effet tunnel (2) et en ce que ladite couche isolante est réalisée dans un matériau ferroélectrique dont la polarisation en fonction du champ électrique créé dans le matériau est

définie par une pluralité de cycles d'hystérésis imbriqués les uns dans les autres et contigus les uns aux autres, la résistance du dispositif dépendant de la polarisation du matériau ferroélectrique.

**WO 2010/142762 A1**



---

SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG). **Publiée :**

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

**DISPOSITIF FERROÉLECTRIQUE À RÉSISTANCE AJUSTABLE**

La présente invention concerne un dispositif à résistance ajustable, couramment appelé memristor. Elle s'applique par exemple dans le domaine des circuits neuromimétiques du type réseaux neuronaux sur puce et plus généralement aux architectures de calculateurs.

Ces 50 dernières années, l'informatique purement numérique de type Von Neumann a fait des progrès considérables. Cependant, même les ordinateurs les plus puissants dotés des algorithmes les plus évolués ne parviennent pas à réaliser rapidement des traitements en apparence simples, tels que l'interprétation d'images, pourtant réalisés en une fraction de seconde par le cerveau humain. Ce dernier en effet fonctionne de manière massivement parallèle et analogique, contrairement aux ordinateurs actuels. Les circuits neuromimétiques analogiques réalisés sur puce, qui tentent de reproduire le fonctionnement du cerveau humain, peuvent permettre d'aller au-delà des architectures conventionnelles. Les architectures à réseaux de neurones fonctionnent à partir de méthodes d'apprentissage : un circuit est entraîné à réagir de la façon désirée à une entrée donnée. Ceci est obtenu en ajustant les valeurs des composants du circuit de manière à converger vers la sortie souhaitée pour une entrée donnée. Une implémentation sur puce requiert donc l'utilisation de composants nanométriques, analogiques, reconfigurables et rapides.

Jusqu'en 2008, les circuits neuromimétiques sur puces étaient entièrement réalisés avec des transistors. Notamment, plusieurs transistors étaient utilisés pour reproduire la plasticité d'une seule synapse connectant deux neurones.

Mais en 2008, il est proposé de réaliser des circuits neuronaux en utilisant un transistor par neurone et un « memristor » par synapse connectant deux neurones (D. B. Strukov et al., Nature 453, 80 (2008) et J.J. Yang et al., Nature Nano. 3, 429 (2008)). Un memristor est une résistance nanométrique de valeur configurable dans une plage continue par la charge électrique qui l'a précédemment traversée. Dans le cas présent des circuits neuronaux, son application principale est de simuler sur puce la plasticité des synapses. Un memristor de ce type forme une structure comportant une couche isolante insérée entre des couches métalliques ordinaires. En

appliquant un courant à la structure, des lacunes d'oxygène se créent, qui vont migrer sous l'effet de la tension et induire un changement de résistance. Le fonctionnement de ces memristors repose donc sur l'effet d'électromigration des ions.

5

Malheureusement, cet effet d'électromigration des ions peut conduire à de forts échauffements et donc à une fragilité potentielle du dispositif. Mais surtout, cet effet d'électromigration des ions implique une vitesse de fonctionnement faible puisque liée à la mobilité des ions: la

10 résistance des memristors de l'art antérieur varie lentement.

C'est pourquoi la demanderesse s'est orientée vers une technologie radicalement différente à savoir, une jonction à effet tunnel comprenant deux électrodes conductrices séparées par une barrière à effet tunnel réalisée en matériau ferroélectrique.

15

De la demande de brevet EP0657936 on connaît des diodes à deux états (passant et non passant) basées sur des jonctions à effet tunnel dont la barrière est réalisée en matériau ferroélectrique présentant deux états de polarisation stables et identifiables. On fait commuter la diode de manière reproductible entre ses deux états en modifiant la polarisation de la barrière

20 par application, aux bornes de la jonction, d'une tension telle que le champ électrique créé au sein du matériau ferroélectrique est supérieur, en valeur absolue, au champ électrique coercitif. Le champ électrique coercitif est la valeur absolue minimum du champ électrique qu'il faut appliquer au sein du matériau ferroélectrique pour changer la polarisation du matériau

25 ferroélectrique. Lorsqu'on supprime le champ électrique au sein du matériau ou lorsqu'on lui applique un champ électrique de valeur absolue inférieure à celle du champ électrique coercitif, la polarisation obtenue précédemment est conservée. La diode a mémorisé l'état de polarisation imposé par le champ électrique précédemment appliqué.

30

Dans la demande de brevet EP0657936 il est précisé qu'il est possible de réaliser une diode présentant plus de deux états de polarisation mais en se basant sur une jonction à effet tunnel comprenant une pluralité de couches de matériaux ferroélectriques présentant des champs coercitifs différents.

Dans l'article "Tunneling across a ferroelectric" Science (2006) (Tsymbal et al.), il est proposé de réaliser une mémoire non volatile à deux états en se basant sur une jonction à effet tunnel présentant une barrière réalisée dans un matériau ferroélectrique. Il est en outre démontré que la  
5 résistance du matériau ferroélectrique dépend très fortement de la polarisation de celui-ci. En appliquant aux bornes de la jonction, une tension telle que le champ électrique au sein du matériau ferroélectrique est supérieur en valeur absolue au champ électrique coercitif, on modifie l'état de polarisation et donc la résistance du matériau ferroélectrique. Il est  
10 possible de déterminer l'état de polarisation (ou la résistance du matériau) de façon non destructive en appliquant aux bornes de la jonction une tension telle que le champ électrique créé au sein du matériau est inférieur (en valeur absolue) au champ électrique coercitif.

Malheureusement, ces dispositifs ne permettent pas de faire varier  
15 continûment la résistance car la barrière tunnel ne présente que deux états de polarisation vers lesquels elle tend irrémédiablement. Il ne s'agit donc pas de memristor.

L'invention a pour but de fournir un memristor, c'est-à-dire un dispositif dont la valeur de la résistance peut être ajustée continuellement dans  
20 une plage large et continue en exploitant la variation de la polarisation d'un matériau ferroélectrique.

A cet effet, l'invention a pour objet un dispositif à résistance ajustable dont la résistance peut prendre plus de deux valeurs, ledit dispositif  
25 comportant un empilement de deux électrodes conductrices séparées par une couche isolante, l'empilement des électrodes séparées par la couche isolante formant une jonction à effet tunnel et ladite couche isolante étant réalisée dans un matériau ferroélectrique dont la polarisation en fonction du champ électrique créé dans le matériau est définie par une pluralité de cycles  
30 d'hystérésis imbriqués les uns dans les autres et contigus les uns aux autres, la résistance du dispositif dépendant de la polarisation du matériau ferroélectrique.

Le dispositif selon l'invention peut présenter en outre, une ou plusieurs des caractéristiques suivantes prises ensemble ou séparément :

- il comporte des moyens pour faire varier la polarisation du matériau ferroélectrique par application d'une tension d'écriture entre les deux électrodes de telle sorte que la résistance du dispositif lorsqu'une tension de lecture est ensuite appliquée entre les deux électrodes par des moyens de lecture est ajustable dans une plage continue de valeurs,
  - la tension d'écriture est appliquée à un dispositif se trouvant dans un état initial dans lequel la tension entre les électrodes est égale à une tension initiale et dans lequel le dispositif présente une résistance initiale, la valeur de la résistance du dispositif à la tension de lecture dépendant de la tension d'écriture précédemment appliquée ainsi que de l'état initial,
  - le sens de variation de la valeur de la résistance du dispositif à la tension de lecture est égal au sens de variation de la tension d'écriture ou au signe de la tension d'écriture lorsque la tension de commande ne varie pas,
  - la tension de lecture est au moins deux fois inférieure en valeur absolue à la tension d'écriture précédemment appliquée,
  - la valeur absolue de la tension d'écriture est comprise entre 1V et 10V,
  - la valeur absolue de la tension de lecture est comprise entre 0,001 V et 2V,
  - l'épaisseur de la couche isolante est comprise entre 1 et 10 nm,
  - l'épaisseur de la couche isolante est comprise entre 1 et 5 nm,
- le matériau ferroélectrique est du type relaxeur,
- le matériau ferroélectrique est le  $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$  ou un alliage  $(\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3)_{1-x}(\text{PbTiO}_3)_x$  ou un alliage  $\text{PbZn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$  ou un alliage  $(\text{PbZn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3)_{1-x}(\text{PbTiO}_3)_x$  ou un alliage  $\text{PbSc}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$  ou un alliage  $(\text{PbSc}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3)_{1-x}(\text{PbSc}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3)_x$  ou  $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$  avec x supérieur ou égal à 0 ou bien un alliage  $\text{BaTi}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_3$  ou  $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$  avec x supérieur à 0.
  - le matériau ferroélectrique est du type classique c'est-à-dire un matériau ferroélectrique dont la polarisation en fonction du champ électrique créé au sein du matériau ferroélectrique est définie par un unique cycle d'hystérésis lorsqu'il présente une épaisseur supérieure à 10nm,
  - le matériau ferroélectrique est un alliage  $\text{BaTiO}_3$  ou un alliage  $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$  ou un alliage  $\text{BiFeO}_3$  éventuellement substitué en ions 3+ (La, Nd, Sm, etc) ou 2+ (Pb, Ca, Sr, etc) en site Bi,

- les électrodes sont réalisées soit à partir de matériaux conducteurs soit à partir de matériaux semi-conducteurs,
- les électrodes présentent une épaisseur comprise entre 5 nm et 100 nm,
- 5       - les électrodes sont réalisées à partir du même matériau,
- les électrodes sont réalisées à partir de matériaux différents,
- la tension d'écriture est appliquée pendant un temps compris entre  $10^{-9}$  secondes et  $10^{-3}$  secondes,
- la tension de lecture est appliquée pendant un temps compris
- 10   entre  $10^{-9}$  secondes et  $10^{-6}$  secondes,
- les moyens pour faire varier la polarisation sont aussi les moyens de lecture,
- la polarisation du matériau ferroélectrique présente une valeur nulle au niveau des champs électriques coercitifs et en ce que la pente des
- 15   cycles d'hystérésis au niveau des champs électriques coercitifs est inférieure ou égale à  $10^{-5}$  C.V.m<sup>-1</sup>,
- pour un matériau ferroélectrique donné, un (ou des) matériaux ferroélectriques constituant les électrodes donnés ainsi que leurs épaisseurs respectives données, les tensions d'écriture et de lecture appliquées se
- 20   trouvent dans des plages de valeurs qui ne se chevauchent pas.

L'invention a également pour objet une synapse excitatrice entre deux neurones d'un réseau de neurones d'un circuit neuromimétique, ladite synapse comprenant un dispositif selon l'invention, la tension d'écriture diminuant de sorte à diminuer la valeur de la résistance dudit dispositif à une

25   tension de lecture donnée.

L'invention a également pour objet une synapse inhibitrice entre deux neurones d'un réseau de neurones d'un circuit neuromimétique, ladite synapse comprenant un dispositif selon l'invention, la tension d'écriture augmentant de sorte à augmenter la valeur de la résistance dudit dispositif à

30   une tension de lecture donnée.

L'invention a en outre pour objet une synapse hybride entre deux neurones d'un réseau de neurones d'un circuit neuromimétique, ladite synapse comprenant un dispositif selon l'invention, la tension d'écriture subissant des augmentations et des diminutions.

Un memristor selon l'invention, du fait qu'il se base sur l'effet tunnel, est dépourvu des problèmes d'un dispositif se basant sur l'effet d'électromigration dans lequel des atomes migrent et modifient structurellement la couche isolante et les électrodes. Un memristor selon l'invention fournit une résistance dont la valeur peut être ajustée rapidement, sur de larges plages de valeurs, de façon précise. Il est par ailleurs plus robuste qu'un dispositif de l'art antérieur exploitant l'effet d'électromigration. De ce fait, il fournit des résultats reproductibles sur la durée.

10 D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à l'aide de la description qui suit faite en regard de dessins annexés qui représentent :

- la figure 1, par un schéma, une illustration d'un exemple de dispositif à résistance ajustable selon l'invention;
- 15 - la figure 2, par un schéma, un cycle d'hystérésis représentant le comportement de la polarisation d'un matériau ferroélectrique classique en fonction du champ électrique appliqué au sein de matériau,
- la figure 3a, par un schéma, le comportement de la polarisation d'une barrière ferroélectrique du type relaxeur en fonction de la valeur du champ électrique imposé dans la barrière, la figure 3b, par un schéma, le comportement de la résistance de la jonction en fonction de la valeur du champ électrique,
- 20 - la figure 4a, par un schéma, un exemple de cycle d'écriture et de lecture de la résistance du dispositif selon l'invention à partir d'un état initial;
- 25 les figures 4b et 4c, par des schémas, les étapes suivant l'étape représentées sur la figure 4a, lorsque le dispositif selon l'invention est utilisé en tant que synapse inhibitrice dans un réseau de neurones,
- les figures 5a, 5b, 5c, par un schéma, un exemple de cycles d'écriture et lecture successifs pour un dispositif selon l'invention utilisé en tant que synapse excitatrice,
- 30 - les figures 6a, 6b, 6c, par un schéma, un exemple de cycles d'écriture et lecture successifs pour un dispositif selon l'invention utilisé en tant que synapse hybride.



Sur la figure 1, on a représenté schématiquement un dispositif 1 à résistance ajustable selon l'invention. Il comprend une jonction 2 à effet tunnel comprenant elle-même un empilement, dans un axe z, de deux électrodes conductrices inférieure 3, et supérieure 4 séparées par une  
5 barrière à effet tunnel 5 réalisée dans un matériau ferroélectrique.

L'épaisseur EB de la barrière 5, dans l'axe z, est choisie de sorte que si on applique aux bornes de la jonction tunnel une tension supérieure à un seuil prédéterminé égal à 0,01V et inférieure à la tension seuil d'électromigration du matériau ferroélectrique (typiquement inférieure ou  
10 égale à 5V), des électrons passent, par effet tunnel, d'une électrode à l'autre au travers de la barrière tunnel. Par tension aux bornes de la jonction, on entend une tension appliquée entre les deux électrodes conductrices. Pour obtenir l'effet tunnel, il faut typiquement que l'épaisseur EB de la barrière tunnel n'excède pas 10 nm. On dit que la couche isolante est une couche  
15 mince de matériau ferroélectrique. Comme précisé précédemment, il a été démontré que le courant tunnel qui circule dans une jonction tunnel dépend de la polarisation électrique (exprimée en  $C / m^2$  du matériau ferroélectrique.) Par conséquent, la résistance d'une jonction tunnel dépend de l'état de polarisation du matériau ferroélectrique.

20 Les jonctions tunnel basées sur des matériaux ferroélectriques classiques sont aptes à commuter entre uniquement deux états de résistance différents correspondant à deux états de polarisation opposés P+ et P- car ce sont des matériaux dont le comportement de la polarisation en fonction du champ électrique appliqué suit un cycle d'hystérésis carré du  
25 type de celui qui est représenté sur la figure 2.

Par cycle d'hystérésis carré, on entend un cycle dont la pente est très importante (peu différente de 90°) au niveau des champs électriques coercitifs positif  $E_{c+}$  et négatif  $E_{c-}$  de valeurs opposées et dont la pente est sensiblement nulle à des champs électriques différents. La polarisation du  
30 matériau suit le cycle dans un sens unique indiqué par les flèches sur le cycle représenté sur la figure 2. Lorsqu'on applique aux bornes de la jonction tunnel une tension d'écriture telle que le champ électrique présent au sein du matériau ferroélectrique est supérieur au champ électrique coercitif positif  $E_{c+}$  (respectivement inférieur à  $E_{c-}$ ), la polarisation du matériau prend la

valeur de polarisation positive  $P+$  (respectivement négative  $P-$ ). Cet état de polarisation est conservé en supprimant la commande en tension.

Sur la figure 3a, on a représenté schématiquement le comportement de la polarisation  $P$  d'une barrière ferroélectrique du type relaxeur en fonction de la valeur  $E$  du champ électrique imposé dans la barrière. Sur la figure 3b, on a représenté le comportement de la résistance de la jonction 5 en fonction de la valeur  $E$  du champ électrique (pour simplifier on ne prend pas en compte la dépendance en tension de la résistance propre à la jonction tunnel). Sur les figures 3a et 3b et sur les figures suivantes, pour plus de clarté on n'a représenté que trois cycles imbriqués les uns dans les autres mais le matériau présente une pluralité de cycles contigus les uns aux autres. Le sens de déplacement sur ces cycles est également indiqué par des flèches.

Par cycles contigus, on entend que les cycles se touchent de façon à obtenir une plage continue de valeurs de la polarisation pour un champ électrique donné.

Les matériaux ferroélectriques de type relaxeurs présentent une pluralité de cycles d'hystérésis. Ces cycles sont imbriqués les uns dans les autres. Ils forment un ensemble continu de cycles d'hystérésis, c'est-à-dire un continuum de cycles. Autrement dit, deux cycles adjacents sont contigus. On peut aisément passer d'un cycle à l'autre.

La demanderesse a par ailleurs démontré expérimentalement que certains matériaux ferroélectriques classiques qui présentent, en grande épaisseur, un unique cycle d'hystérésis carré, présentent, en couche ultramince (épaisseur inférieure ou égale à 10 nm), une pluralité de cycles d'hystérésis imbriqués les uns dans les autres et contigus les uns aux autres. Du fait que les cycles sont contigus, on peut passer de l'un à l'autre. Cette propriété est vue comme un défaut dans les applications classiques du type mémoire binaire dans lesquelles on cherche à avoir deux états stables de polarisation dépendant de la tension précédemment appliquée.

On peut montrer que la résistance d'une jonction à effet tunnel qui est très fortement dépendante de la polarisation du matériau ferroélectrique varie de la même manière que la polarisation. Plus précisément, un matériau ferroélectrique présentant une multiplicité de cycles d'hystérésis, représentant le comportement de la Polarisation  $P$  du matériau

ferroélectrique en fonction du champ électrique appliqué au sein de la jonction, imbriqués les uns dans les autres présentent, comme visible sur la figure 3b, une multiplicité de cycles d'hystérésis imbriqués les uns dans les autres et représentant le comportement de la résistance R de la jonction en fonction du champ électrique E créé au sein de la barrière tunnel. Ces cycles sont suivis dans le même sens (représenté par des flèches) que les cycles d'hystérésis de polarisation. Les cycles d'hystérésis représentant le comportement de la résistance en fonction du champ électriques sont en outre contigus les uns aux autres.

Dans le dispositif selon l'invention, la barrière tunnel 5 est réalisée dans un matériau ferroélectrique qui présente une pluralité de cycles d'hystérésis imbriqués les uns dans les autres. Plus précisément, la barrière 5 forme une couche de matériau ferroélectrique du type relaxeur d'épaisseur EB comprise, entre 1 et 10 nm et de préférence, entre 1 et 5 nm ou de matériau ferroélectrique classique en couche mince dont l'épaisseur est comprise entre 1 et 10 nm et de préférence comprise entre 1 et 5 nm.

On peut choisir des matériaux ferroélectriques du type relaxeurs comme par exemple l'alliage  $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$  appelé PMN, l'alliage  $(\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3)_{1-x}(\text{PbTiO}_3)_x$  appelé PMN-PT, l'alliage  $\text{PbZn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$  appelé PZN, l'alliage  $(\text{PbZn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3)_{1-x}(\text{PbTiO}_3)_x$  appelé PZN-PT, l'alliage  $\text{PbSc}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$  appelé PSN, l'alliage  $(\text{PbSc}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3)_{1-x}(\text{PbSc}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3)_x$  appelé PSNT ou l'alliage  $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ , avec x supérieur ou égal à 0 ou bien l'alliage  $\text{BaTi}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_3$  appelé BZT,  $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ , où x est supérieur à 0.

Parmi les matériaux de type classique on peut par exemple choisir des matériaux ferroélectriques du type classique comme, par exemple,  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$  appelé PZT où x est supérieur ou égal à 0 ou  $\text{BiFeO}_3$  éventuellement substitué en ions 3+ (La, Nd, Sm, etc) ou 2+ (Pb, Ca, Sr, etc) en site Bi.

Les matériaux ferroélectriques choisis présentent de préférence des cycles inclinés, c'est-à-dire des cycles dont les pentes  $\alpha = dP/dE$  au niveau des champs électriques coercitifs (champs auxquels la polarisation est nulle) sont faibles, à savoir inférieures à  $10^{-5} \text{ C.V.m}^{-1}$ . La précision de la variation de la polarisation (et donc de la résistance de la jonction) en fonction de la tension appliquées aux bornes de la jonction (proportionnelle au champ électrique E au sein du matériau ferroélectrique) est accrue par

rapport aux matériaux présentant des cycles carrés pour lesquels une faible variation du champ électrique induit une grande variation de la polarisation.

Avantageusement, le dispositif à résistance ajustable selon l'invention comprend des moyens 7 pour faire varier la polarisation P du matériau ferroélectrique. Ces moyens 7 génèrent une tension d'écriture VE aux bornes de la jonction à effet tunnel de telle sorte que la résistance du dispositif est ajustable dans une plage continue de valeurs. Plus précisément, le dispositif est un dispositif à résistance ajustable continument, à savoir un memristor. Les moyens 7 génèrent une tension d'écriture VE aux bornes de la jonction à effet tunnel de telle sorte que la résistance du dispositif est ajustable continument dans une plage continue de valeurs. Cela est réalisé en se basant sur le fait que la couche isolante est réalisée dans un matériau ferroélectrique dont la polarisation en fonction du champ électrique créé au sein du matériau ferroélectrique est définie par une pluralité de cycles d'hystérésis imbriqués les uns dans les autres et contigus les uns aux autres. La résistance du dispositif présente en effet la même caractéristique que la polarisation.

De préférence, la valeur absolue de la tension d'écriture VE est supérieure ou égale à 1V et de préférence comprise entre 1 et 10 Volts en fonction de la constitution du dispositif. Sur la figure 4a, on a représenté (en gras) un cycle d'écriture et de lecture de la résistance du dispositif selon l'invention à partir d'un état initial, par représentation de la résistance R (en ohms) du dispositif en fonction de la tension V (en volts) appliquée aux bornes de la jonction.

Le matériau est initialement dans un état initial dans lequel il a une résistance initiale R0 (correspondant ici à une polarisation nulle) pour une tension initiale Vin appliquée aux bornes de la jonction. Ici la tension initiale est nulle. Les moyens de commande pour faire varier la polarisation du matériau imposent une tension d'écriture VE1 positive aux bornes de la jonction.

On applique une tension de commande pendant un temps, c'est-à-dire une durée, qui est de préférence compris entre  $10^{-9}$  et  $10^{-3}$  secondes. Le temps durant lequel la tension de commande est appliquée peut en effet avoir une influence sur la valeur de la polarisation ferroelectrique et, en conséquence, sur l'état de résistance final.

La résistance du matériau varie en suivant un cycle d'hystérésis allant de l'état initial vers l'état dont la tension d'écriture est VE1. Elle prend une première valeur d'écriture RE1. Cette valeur est imposée par le cycle d'hystérésis. Plus particulièrement, la valeur de la résistance d'écriture  
5 dépend pour un matériau donné de l'état initial et de la tension d'écriture. VE1 appliquée.

Le dispositif comprend en outre des moyens de lecture 8 de la résistance de la jonction qui sont ici des moyens de génération d'une tension de lecture VL aux bornes de la jonction tunnel. En variante, les  
10 moyens pour faire varier la polarisation et les moyens de lecture sont les mêmes. La tension de lecture est la tension à laquelle on lit l'état de résistance, appelée résistance de lecture, du dispositif ou bien la tension à laquelle ce dispositif est utilisé en tant que résistance d'une valeur égale à la résistance de lecture. Dans l'exemple représenté sur la figure 4a, on impose  
15 une tension de lecture VL qui est faible mais non nulle. La première résistance de lecture VL1 est alors sensiblement égale à la résistance rémanente du dispositif. Dans la suite de la description et des figures, pour plus de clarté et étant donné que la tension de lecture est proche de 0V dans les exemples considérés, on considèrera que la résistance de lecture est  
20 égale à la résistance rémanente du dispositif.

La première résistance de lecture est obtenue en suivant le cycle d'hystérésis qui passe par le premier état d'écriture et qui mène à la tension de lecture. On dit que la jonction garde la mémoire de l'état d'écriture car la résistance de lecture dépend de cet état. Autrement dit, la résistance de la  
25 jonction à la tension de lecture dépend de l'état initial et de la tension d'écriture appliquée sur cet état. Elle ne dépend pas uniquement de la tension d'écriture précédemment appliquée.

La tension de lecture est suffisamment importante pour que l'effet tunnel se produise. On peut ainsi lire la résistance de lecture en mesurant le  
30 courant traversant la jonction tunnel à la tension de lecture. Avantagusement, la tension de lecture VL est inférieure en valeur absolue à la tension d'écriture VE. La tension de lecture VL est de préférence au moins deux fois plus faible que la tension d'écriture VE précédente. De préférence, la tension de lecture est suffisamment faible pour que son application aux  
35 bornes de la jonction ne modifie pas l'état de polarisation du matériau

ferroélectrique. On choisit une tension de lecture dont la valeur absolue est de préférence comprise entre 0,001 V et 2V en fonction de la constitution du dispositif. Pour un dispositif donné (matériaux constituant la barrière et les électrodes donnés ainsi que leurs épaisseurs respectives données),  
5 avantageusement, les plages de tension d'écriture et de lecture ne se chevauchent pas (elles sont disjointes). De cette manière l'application de la tension d'écriture fait varier la polarisation alors que l'application d'une tension de lecture plus faible ne fait pas varier la polarisation. Avantageusement, on choisit des temps de lecture, c'est-à-dire des durées  
10 de lecture, de préférence compris entre 1 ns et 1  $\mu$ s. On a ainsi une lecture résistive non destructive. La résistance du dispositif n'est pas modifiée lors de son fonctionnement. On obtient également une lecture résistive non destructive à la tension de lecture plus importante lorsqu'on applique une tension de lecture sur des temps, c'est-à-dire durées, de lecture faibles de  
15 sorte que la lecture de la résistance ou l'utilisation du dispositif n'induisse pas une variation de polarisation de la barrière 5.

Les figures prises ensembles 4a, 4b et 4c illustrent par des schémas les étapes successives d'écriture et de lecture (en gras) liées à l'utilisation du dispositif selon l'invention en tant que synapse inhibitrice d'un  
20 circuit neuromimétique comprenant un réseau de neurones par représentation de la résistance R du dispositif en fonction de la tension V appliquée aux bornes de la jonction. Dans les trois étapes successives, la tension de lecture est peu différente de 0 V, elle est par exemple égale à 0,01V. Une synapse inhibitrice est d'autant plus isolante qu'elle est souvent  
25 sollicitée. Ainsi, dans les synapses inhibitrices, à partir d'un état initial, on applique des tensions d'écritures VE1, VE2, VE3 successives de valeurs de plus en plus importantes choisies de sorte à augmenter la valeur de la résistance de lecture à partir d'une valeur minimale d'une plage continue de valeur. Avantageusement, les tensions successives d'écriture sont choisies  
30 de sorte à faire augmenter continument la résistance de lecture à une tension de lecture donnée.

Après la tension d'écriture VE1, on applique, comme représenté sur la figure 4b, une deuxième tension d'écriture positive VE2 supérieure à VE1, la résistance du matériau ferroélectrique évolue jusqu'à une deuxième  
35 résistance d'écriture RE2. La deuxième résistance de lecture RL2 du

dispositif à la tension de lecture VL est supérieure à la première résistance de lecture RL1. En appliquant ensuite une troisième tension d'écriture positive VE3 supérieure à la tension d'écriture précédemment appliquée VE2, la résistance de la jonction évolue jusqu'à une troisième résistance d'écriture RE3. La troisième résistance de lecture RL3 du dispositif à la tension de lecture VL est supérieure à la deuxième résistance de lecture RL2.

On fait évoluer la résistance de lecture du matériau ferroélectrique à une tension de lecture donnée à partir de la résistance initiale R0 sur un intervalle continu depuis la résistance initiale. Ceci est également valable quand on applique des tension négatives. En effet, la valeur de la résistance de lecture du dispositif selon l'invention varie dans le même sens que la valeur de la tension d'écriture ou dans le même sens que signe de la tension d'écriture lorsque la tension de commande ne varie pas (si on applique plusieurs fois une même tension d'écriture positive, la résistance augmente.)

L'invention a également pour objet une synapse excitatrice disposée entre deux neurones d'un réseau de neurone d'un circuit neuromimétique dont un exemple de commandes de lecture et écriture successives est représenté sur les figures 5a, 5b et 5c par représentation de la résistance R du dispositif en fonction de la tension V appliquée aux bornes de la jonction. Dans de telles synapses, à partir d'un état initial (de résistance initiale R0 nulle à tension nulle), on applique des tensions d'écriture successives VE1, VE2, VE3 négatives de valeurs de plus en plus faibles de sorte à diminuer les valeurs de résistances associées RL1, RL2, RL3 à la tension de lecture VL (peu différente de 0V) à partir d'une valeur maximale peu différente de la résistance initiale R0. Avantagement, les tensions successives d'écriture sont choisies de sorte à faire diminuer continument la résistance de lecture à une tension de lecture donnée.

L'invention a également pour objet une synapse hybride disposée entre deux neurones d'un réseau de neurones d'un circuit neuromimétique dont un exemple de commande est représenté sur les figures 6a, 6b, 6c par représentation de la résistance R du dispositif en fonction de la tension V appliquée aux bornes de la jonction. Dans de telles synapses, à partir d'un état initial, on applique des tensions d'écriture successives VE1, VE2, VE3, VE4 de valeurs choisies de sorte que la résistance de lecture suive une

évolution prédéterminée. Dans l'exemple des figures 6a à 6c, la résistance de lecture augmente de RL1 à RL2 puis diminue jusqu'à RL3 et augmente jusqu'à RL4 inférieure à RL2. A cet effet VE1 et VE2 sont positives et VE2 est supérieure à VE1. VE3 est négative et, par exemple, de valeur absolue inférieure à la valeur absolue de VE2. VE4 est positive et de valeur absolue inférieure à la valeur absolue de VE2.

Par ailleurs, les courants de lecture, même faibles, varient dans une large plage de valeurs à une tension de lecture donnée. Un memristor selon l'invention est donc intéressant car sa résistance est ajustable sur une large plage de valeurs. En effet, la demanderesse a démontré expérimentalement que dans une jonction tunnel intégrant comme barrière une couche ultramince d'un ferroélectrique, on peut obtenir une pluralité de valeurs de résistance tunnel variant, à tension de lecture donnée, sur une large plage telle que la résistance maximale est typiquement de 100 à 1000 fois plus élevée que la résistance minimale.

Dans le dispositif à résistance variable selon l'invention, les électrodes conductrices 3 et 4 sont réalisées à partir de matériaux conducteurs ou semi-conducteurs. Il s'agit par exemple d'oxydes conducteurs comme par exemple les alliages  $\text{SrRuO}_3$ ,  $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ ,  $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_3$ ,  $\text{IrO}_2$ ,  $\text{RuO}_2$ . Il peut également d'agir de semi-conducteurs comme par exemple les alliages  $\text{ZnO}$  dopé,  $\text{SnO}_2$  dopé,  $\text{In}_2\text{O}_3$  dopé, ITO. Il peut en outre s'agir de métaux comme par exemple Pt ou Au. Les électrodes 3, 4 présentent de préférence une épaisseur EE comprise entre 5 nm et 100 nm.

Pour que la plage de valeurs sur laquelle la résistance est capable de varier présente une taille maximale, les deux électrodes sont réalisées dans deux matériaux différents, notamment en termes de densités de porteurs.

La taille de la jonction est soit définie par la forme de l'électrode supérieure 4, lorsque la section de celle-ci dans le plan perpendiculaire à l'axe de la jonction z est de plus petite taille que celle de la section de la couche isolante. Dans le cas contraire, lorsque l'ensemble formé par l'électrode supérieure et la couche isolante est gravé sous forme de pilier sur l'électrode inférieure, la taille de la jonction est égale à la section du pilier. La section de la jonction est par exemple rectangulaire ou de géométrie plus



complexe. La taille de la jonction peut atteindre des sections inférieures à  $50 \times 50 \text{ nm}^2$ .

## REVENDICATIONS

1. Dispositif (1) à résistance ajustable dont la résistance peut prendre plus de deux valeurs, ledit dispositif comportant un empilement de deux électrodes conductrices (3, 4) séparées par une couche isolante (5),  
5 caractérisé en ce que l'empilement des électrodes (3, 4) séparées par la couche isolante (5) forme une jonction à effet tunnel (2), et en ce que ladite couche isolante (5) est réalisée dans un matériau ferroélectrique dont la polarisation en fonction du champ électrique créé au sein du matériau ferroélectrique est définie par une pluralité de cycles  
10 d'hystérésis imbriqués les uns dans les autres et contigus les uns aux autres, ledit dispositif comportant des moyens (7) pour faire varier la polarisation du matériau ferroélectrique par application d'une tension d'écriture (VE) entre les deux électrodes (3,4) de telle sorte que la résistance (RL) du dispositif, lorsqu'une tension de lecture (VL) est  
15 ensuite appliquée entre les deux électrodes (3,4) par des moyens de lecture (8), est ajustable continument dans une plage continue de valeurs.
2. Dispositif (1) à résistance ajustable selon la revendication précédente, dans lequel les moyens (7) pour faire varier la polarisation du matériau  
20 ferroélectrique appliquent une succession de tensions d'écriture (VE) de plus en plus importantes ou une pluralité de fois la même tension d'écriture (VE) positive pour faire augmenter la résistance du dispositif (RL) à la tension de lecture (VL).
- 25 3. Dispositif (1) à résistance ajustable selon la revendication 1, dans lequel les moyens (7) pour faire varier la polarisation du matériau ferroélectrique appliquent une succession de tensions d'écriture (VE) de moins en moins importantes ou une pluralité de fois la même tension d'écriture (VE) négative pour faire diminuer la résistance du dispositif (RL) à la tension  
30 de lecture (VL).
4. Dispositif (1) à résistance ajustable selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la tension de lecture (VL) est au

moins deux fois inférieure en valeur absolue à la tension d'écriture (VE) précédemment appliquée.

5. Dispositif (1) à résistance ajustable selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'épaisseur de la couche isolante est comprise entre 1 et 10 nm et de préférence comprise entre 1 et 5 nm.
6. Dispositif (1) à résistance ajustable selon la revendication 5, dans lequel le matériau ferroélectrique est du type relaxeur.
7. Dispositif (1) à résistance ajustable selon la revendication précédente, dans lequel le matériau ferroélectrique est le  $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$  ou un alliage  $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3)_{1-x}(\text{PbTiO}_3)_x$  ou un alliage  $\text{PbZn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$  ou un alliage  $(\text{PbZn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3)_{1-x}(\text{PbTiO}_3)_x$  ou un alliage  $\text{PbSc}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$  ou un alliage  $(\text{PbSc}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3)_{1-x}(\text{PbSc}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3)_x$ ,  $\text{BaTi}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_3$  ou un alliage  $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ ,  $\text{BaTi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ .
8. Dispositif (1) à résistance ajustable selon la revendication 5, dans lequel le matériau ferroélectrique est du type classique c'est-à-dire un matériau ferroélectrique dont la polarisation en fonction du champ électrique créé au sein du matériau ferroélectrique est définie par un unique cycle d'hystérésis lorsqu'il présente une épaisseur supérieure à 10 nm.
9. Dispositif (1) à résistance ajustable selon la revendication 8, dans lequel le matériau ferroélectrique est un alliage  $\text{BaTiO}_3$  ou un alliage  $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$  ou un alliage  $\text{BiFeO}_3$  éventuellement substitué en ions 3+ (La, Nd, Sm, etc) ou 2+ (Pb, Ca, Sr, etc) en site Bi.
10. Dispositif (1) à résistance ajustable selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les électrodes conductrices (3,4) sont réalisées soit à partir de matériaux conducteurs soit à partir de matériaux semi-conducteurs.
11. Dispositif (1) à résistance ajustable selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel pour un matériau ferroélectrique

donné, un (ou des) matériau(x) ferroélectrique(s) constituant les électrodes donnés ainsi que leurs épaisseurs respectives données, les plages de valeur dans lesquelles se trouvent les tensions d'écriture et de lecture appliquées ne se chevauchent pas.

5

12. Dispositif (1) à résistance ajustable selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les moyens (7) pour faire varier la polarisation sont aussi les moyens de lecture (8).

10 13. Synapse excitatrice entre deux neurones d'un réseau de neurones d'un circuit neuromimétique, ladite synapse comprenant un dispositif (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle la tension d'écriture diminue de sorte à diminuer la valeur de la résistance dudit dispositif à une tension de lecture donnée.

15

14. Synapse inhibitrice entre deux neurones d'un réseau de neurones d'un circuit neuromimétique, ladite synapse comprenant un dispositif (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, dans laquelle la tension d'écriture augmente de sorte à augmenter la valeur de la résistance dudit  
20 dispositif à une tension de lecture donnée.

15. Synapse hybride entre deux neurones d'un réseau de neurones d'un circuit neuromimétique, ladite synapse comprenant un dispositif (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, dans laquelle la tension  
25 d'écriture subit des augmentations et des diminutions.

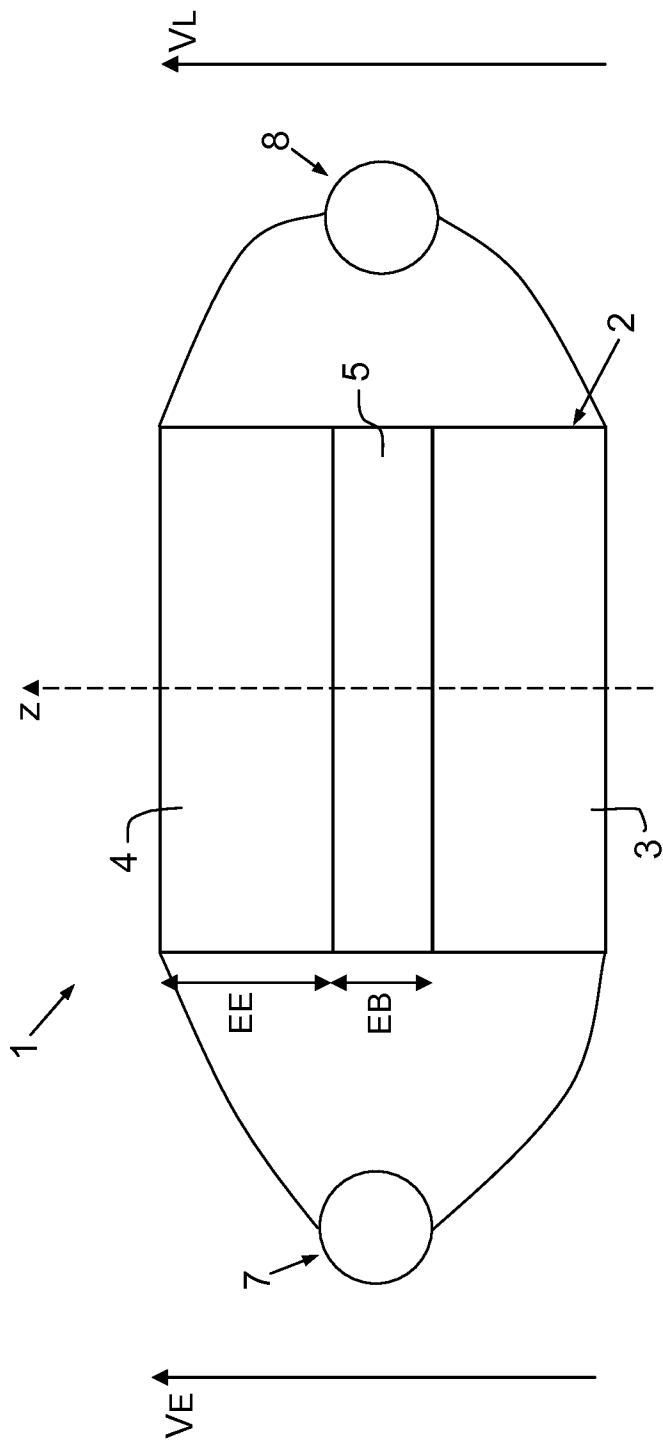


FIG.1

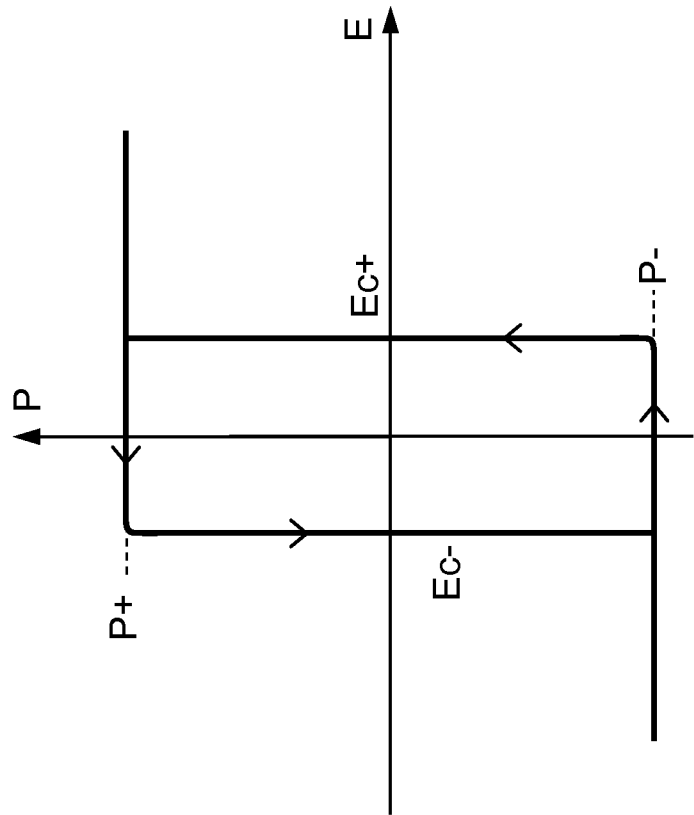


FIG.2

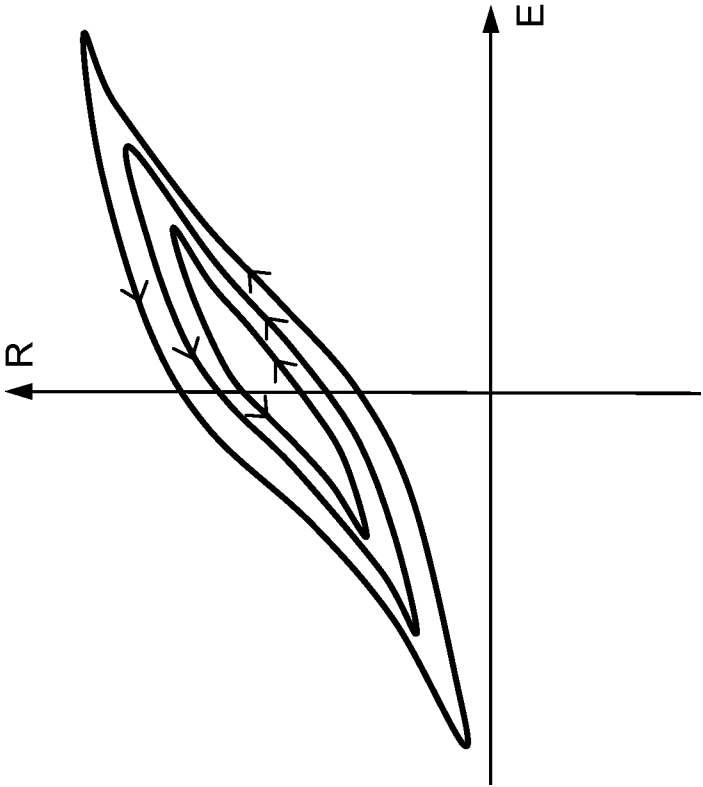


FIG. 3b

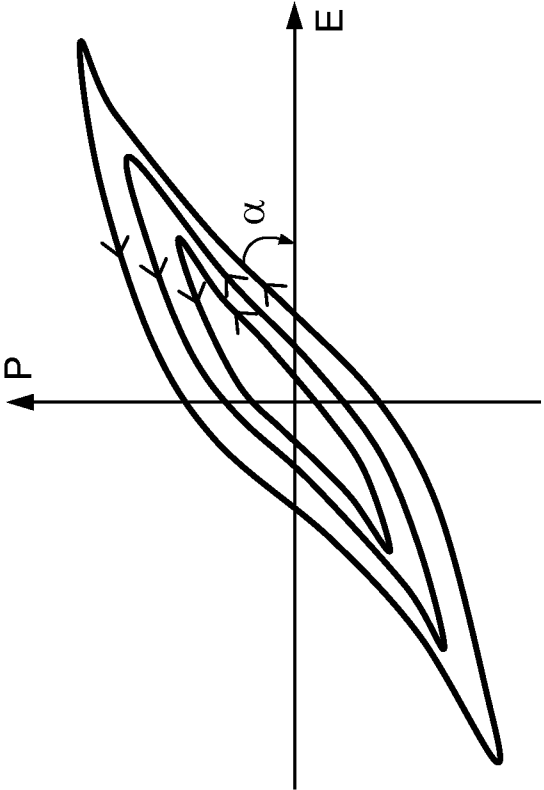


FIG. 3a

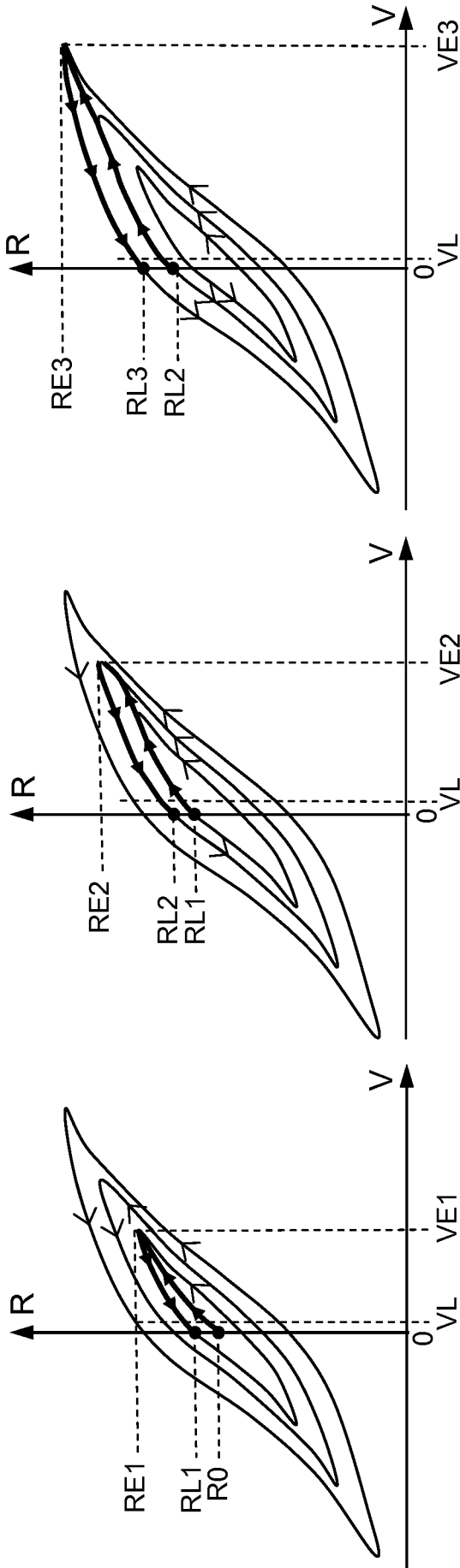


FIG.4c

FIG.4b

FIG.4a



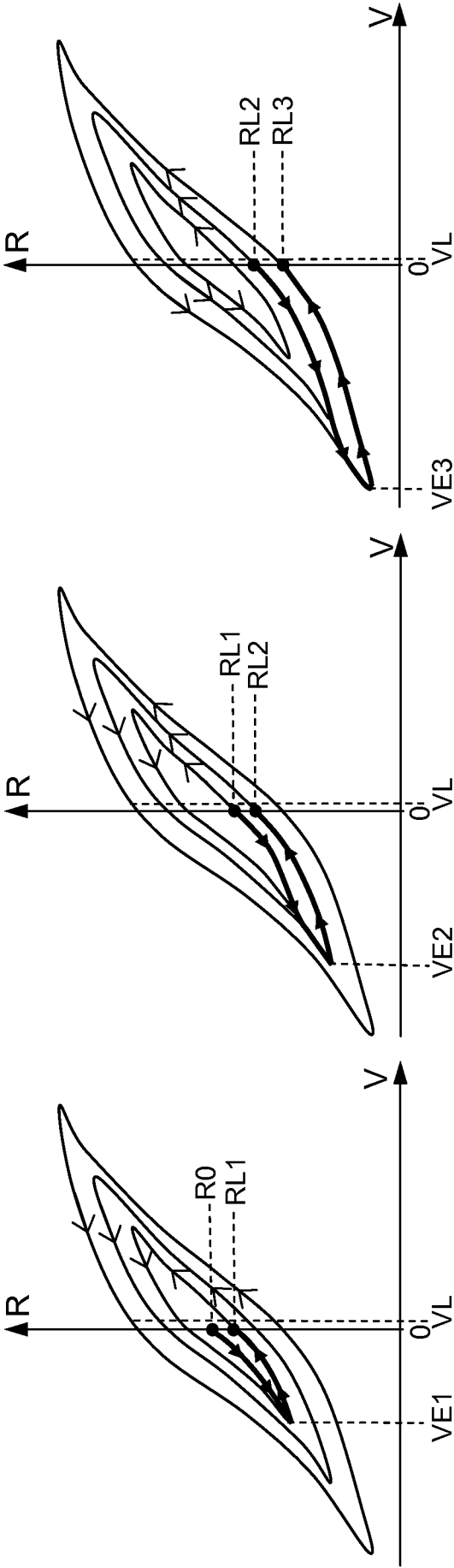


FIG.5c

FIG.5b

FIG.5a

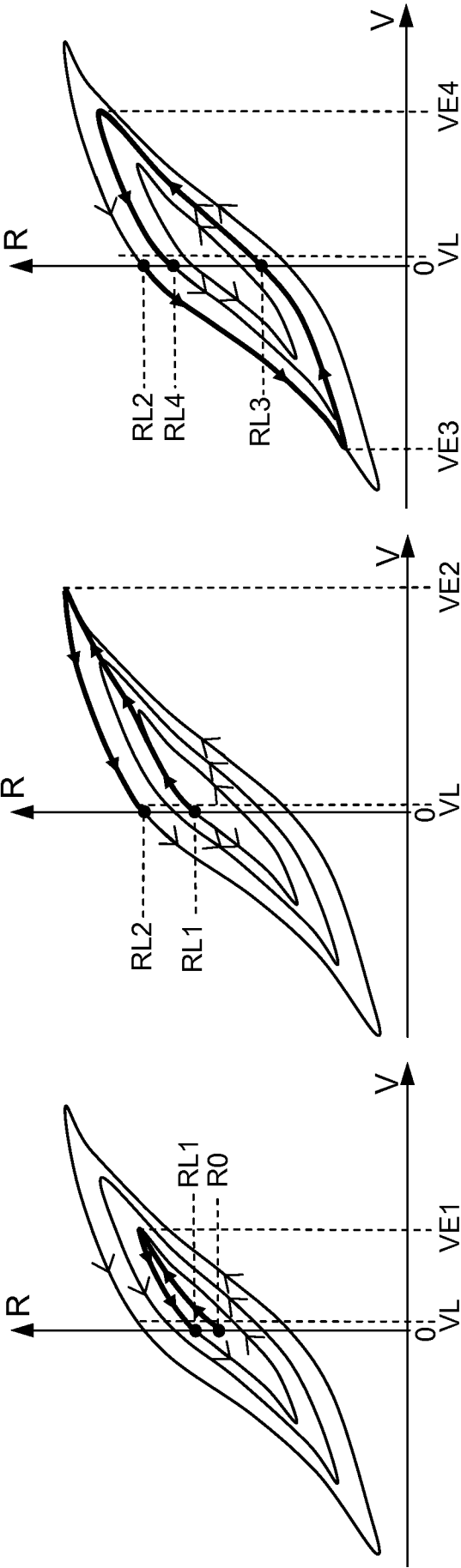


FIG. 6c

FIG. 6b

FIG. 6a

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2010/058149

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. G11C11/56 G11C11/22 G11C11/38 G11C27/00  
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G11C H01L G06N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, INSPEC

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                              | Relevant to claim No. |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| X         | WO 02/45172 A (FORSCHUNGSZENTRUM JUELICH GMBH [DE]; KOHLSTEDT HERMANN [DE]; RODRIGUEZ) 6 June 2002 (2002-06-06) | 1-3,5-12              |
| Y         | pages 3-4,8-10; figures 1,2                                                                                     | 4,13-15               |
| X         | EP 0 657 936 A (PHILIPS ELECTRONICS NV [NL] KONINKL PHILIPS ELECTRONICS NV [NL]) 14 June 1995 (1995-06-14)      | 1,5,8-12              |
| Y         | figures 1-5                                                                                                     | 4,13-15               |
| X         | US 2006/145225 A1 (KOHLSTEDT HERMANN [DE] ET AL KOHLSTEDT HERMAN [DE] ET AL) 6 July 2006 (2006-07-06)           | 1,5-12                |
| Y         | paragraphs [0020] - [0024], [0029] - [0031], [0034], [0036], [0061], [0074]                                     | 4,13-15               |
|           | -----<br>-/--                                                                                                   |                       |

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents :

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- \*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- \*G\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

19 July 2010

Date of mailing of the international search report

27/07/2010

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Havard, Corinne

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2010/058149

## C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                | Relevant to claim No. |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| X         | US 2002/089005 A1 (WICKRAMASINGHE HEMANTHA K [US] ET AL) 11 July 2002 (2002-07-11)                                                                | 1,5,8-12              |
| Y         | figures 1,2<br>-----                                                                                                                              | 4,13-15               |
| Y         | WO 2004/040647 A (INFINEON TECHNOLOGIES AG [DE]; MIKOLAJICK THOMAS [DE]; MOERT MANFRED []) 13 May 2004 (2004-05-13)<br>page 5, lines 3-7<br>----- | 4                     |
| Y         | US 2003/155602 A1 (KRIEGER JURI H [US] ET AL) 21 August 2003 (2003-08-21)<br>paragraph [0003]<br>-----                                            | 13-15                 |
| Y         | US 6 141 241 A (OVSHINSKY STANFORD R [US] ET AL) 31 October 2000 (2000-10-31)<br>columns 18,21; figures 7,16<br>-----                             | 13-15                 |

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2010/058149

| Patent document<br>cited in search report |    | Publication<br>date | Patent family<br>member(s)                                                                                         | Publication<br>date                                                                            |
|-------------------------------------------|----|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| WO 0245172                                | A  | 06-06-2002          | DE 10059357 A1<br>EP 1338039 A1                                                                                    | 13-06-2002<br>27-08-2003                                                                       |
| EP 0657936                                | A  | 14-06-1995          | BE 1007865 A3<br>CN 1109639 A<br>DE 69428577 D1<br>DE 69428577 T2<br>JP 3950179 B2<br>JP 7202227 A<br>US 5541422 A | 07-11-1995<br>04-10-1995<br>15-11-2001<br>27-06-2002<br>25-07-2007<br>04-08-1995<br>30-07-1996 |
| US 2006145225                             | A1 | 06-07-2006          | DE 10303316 A1<br>EP 1588373 A1<br>WO 2004068499 A1                                                                | 12-08-2004<br>26-10-2005<br>12-08-2004                                                         |
| US 2002089005                             | A1 | 11-07-2002          | CN 1254188 A<br>JP 3560517 B2<br>JP 2000216349 A<br>KR 20000035119 A<br>SG 97818 A1<br>TW 505922 B                 | 24-05-2000<br>02-09-2004<br>04-08-2000<br>26-06-2000<br>20-08-2003<br>11-10-2002               |
| WO 2004040647                             | A  | 13-05-2004          | DE 10250357 A1                                                                                                     | 19-05-2004                                                                                     |
| US 2003155602                             | A1 | 21-08-2003          | US 2003179633 A1                                                                                                   | 25-09-2003                                                                                     |
| US 6141241                                | A  | 31-10-2000          | NONE                                                                                                               |                                                                                                |

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2010/058149

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                 |                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE</b><br>INV. G11C11/56      G11C11/22      G11C11/38      G11C27/00<br>ADD.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                 |                                                                  |
| Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                 |                                                                  |
| <b>B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE</b><br>Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)<br>G11C H01L G06N                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                 |                                                                  |
| Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                 |                                                                  |
| Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)<br>EPO-Internal, WPI Data, INSPEC                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                 |                                                                  |
| <b>C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                 |                                                                  |
| Catégorie*                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents                  | no. des revendications visées                                    |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | WO 02/45172 A (FORSCHUNGSZENTRUM JUELICH GMBH [DE]; KOHLSTEDT HERMANN [DE]; RODRIGUEZ) 6 juin 2002 (2002-06-06) | 1-3,5-12                                                         |
| Y                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | pages 3-4,8-10; figures 1,2<br>-----                                                                            | 4,13-15                                                          |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | EP 0 657 936 A (PHILIPS ELECTRONICS NV [NL] KONINKL PHILIPS ELECTRONICS NV [NL]) 14 juin 1995 (1995-06-14)      | 1,5,8-12                                                         |
| Y                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | figures 1-5<br>-----                                                                                            | 4,13-15                                                          |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | US 2006/145225 A1 (KOHLSTEDT HERMANN [DE] ET AL KOHLSTEDT HERMAN [DE] ET AL) 6 juillet 2006 (2006-07-06)        | 1,5-12                                                           |
| Y                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | alinéas [0020] - [0024], [0029] - [0031], [0034], [0036], [0061], [0074]<br>-----                               | 4,13-15                                                          |
| -/--                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                 |                                                                  |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <span><input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents</span> <span><input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe</span> </div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                 |                                                                  |
| <div style="display: flex;"> <div style="flex: 1;"> <p>* Catégories spéciales de documents cités:</p> <p>*A* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent</p> <p>*E* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date</p> <p>*L* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)</p> <p>*O* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens</p> <p>*P* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée</p> </div> <div style="flex: 1;"> <p>*T* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention</p> <p>*X* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément</p> <p>*Y* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier</p> <p>*Z* document qui fait partie de la même famille de brevets</p> </div> </div> |                                                                                                                 |                                                                  |
| Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                 | Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale |
| 19 juillet 2010                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                 | 27/07/2010                                                       |
| Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                 | Fonctionnaire autorisé                                           |
| Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2<br>NL - 2280 HV Rijswijk<br>Tel. (+31-70) 340-2040,<br>Fax: (+31-70) 340-3016                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                 | Havard, Corinne                                                  |

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande Internationale n°

PCT/EP2010/058149

| C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS |                                                                                                                                                   |                               |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Catégorie*                                      | Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents                                                    | no. des revendications visées |
| X                                               | US 2002/089005 A1 (WICKRAMASINGHE HEMANTHA K [US] ET AL) 11 juillet 2002 (2002-07-11)                                                             | 1,5,8-12                      |
| Y                                               | figures 1,2                                                                                                                                       | 4,13-15                       |
| Y                                               | -----<br>WO 2004/040647 A (INFINEON TECHNOLOGIES AG [DE]; MIKOLAJICK THOMAS [DE]; MOERT MANFRED []) 13 mai 2004 (2004-05-13)<br>page 5, ligne 3-7 | 4                             |
| Y                                               | -----<br>US 2003/155602 A1 (KRIEGER JURI H [US] ET AL) 21 août 2003 (2003-08-21)<br>alinéa [0003]                                                 | 13-15                         |
| Y                                               | -----<br>US 6 141 241 A (OVSHINSKY STANFORD R [US] ET AL) 31 octobre 2000 (2000-10-31)<br>colonnes 18,21; figures 7,16                            | 13-15                         |
|                                                 | -----                                                                                                                                             |                               |

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2010/058149

| Document brevet cité<br>au rapport de recherche |    | Date de<br>publication | Membre(s) de la<br>famille de brevet(s)                                                                            | Date de<br>publication                                                                         |
|-------------------------------------------------|----|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| WO 0245172                                      | A  | 06-06-2002             | DE 10059357 A1<br>EP 1338039 A1                                                                                    | 13-06-2002<br>27-08-2003                                                                       |
| EP 0657936                                      | A  | 14-06-1995             | BE 1007865 A3<br>CN 1109639 A<br>DE 69428577 D1<br>DE 69428577 T2<br>JP 3950179 B2<br>JP 7202227 A<br>US 5541422 A | 07-11-1995<br>04-10-1995<br>15-11-2001<br>27-06-2002<br>25-07-2007<br>04-08-1995<br>30-07-1996 |
| US 2006145225                                   | A1 | 06-07-2006             | DE 10303316 A1<br>EP 1588373 A1<br>WO 2004068499 A1                                                                | 12-08-2004<br>26-10-2005<br>12-08-2004                                                         |
| US 2002089005                                   | A1 | 11-07-2002             | CN 1254188 A<br>JP 3560517 B2<br>JP 2000216349 A<br>KR 20000035119 A<br>SG 97818 A1<br>TW 505922 B                 | 24-05-2000<br>02-09-2004<br>04-08-2000<br>26-06-2000<br>20-08-2003<br>11-10-2002               |
| WO 2004040647                                   | A  | 13-05-2004             | DE 10250357 A1                                                                                                     | 19-05-2004                                                                                     |
| US 2003155602                                   | A1 | 21-08-2003             | US 2003179633 A1                                                                                                   | 25-09-2003                                                                                     |
| US 6141241                                      | A  | 31-10-2000             | AUCUN                                                                                                              |                                                                                                |