

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

①1 N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

2 954 855

②1 N° d'enregistrement national :

09 06402

⑤1 Int Cl⁸ : H 01 L 39/24 (2006.01)

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 30.12.09.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 01.07.11 Bulletin 11/26.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

⑦1 Demandeur(s) : THALES Société anonyme — FR.

⑦2 Inventeur(s) : VILLEGAS JAVIER, MARICLHAC
BRUNO, BARTHELEMY AGNES et BIBES MANUEL.

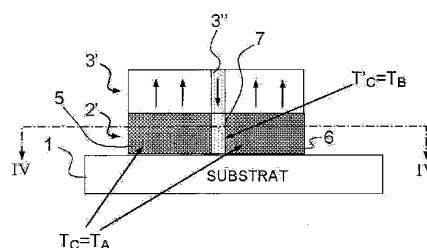
⑦3 Titulaire(s) : THALES Société anonyme.

⑦4 Mandataire(s) : MARKS & CLERK FRANCE.

⑤4 CIRCUIT A JONCTIONS JOSEPHSON A STRUCTURE HYBRIDE SUPRACONDUCTEUR/FERROELECTRIQUE.

⑤7 La présente invention a pour objet un circuit à jonctions Josephson à structure hybride supraconducteur/ferroélectrique, présentant des caractéristiques facilement reproductibles, ne nécessitant pas de températures de fonctionnement trop basses, qui puisse être facilement réparable et pouvant être facilement fabriqué, même en grand nombre sur une même « puce ».

Le circuit de l'invention est caractérisé en ce qu'il comporte sur un substrat (1) un film mince supraconducteur (2) et un film mince ferroélectrique (3), le matériau du film supraconducteur étant un matériau dont la température critique est étroitement liée à sa concentration en porteurs de charges, et le film mince ferroélectrique en un matériau polarisable localement, à échelle submicronique, dans lequel a été induite une polarisation locale, et que le circuit est utilisé à une température inférieure à la température critique.



FR 2 954 855 - A1



CIRCUIT A JONCTIONS JOSEPHSON A STRUCTURE HYBRIDE SUPRACONDUCTEUR / FERROELECTRIQUE

La présente invention se rapporte à un circuit à jonction Josephson à structure
5 hybride supraconducteur / ferroélectrique.

Des applications dans des domaines divers, tels que celui des antennes nécessitant une grande miniaturisation, des convertisseurs analogique-numérique, des capteurs quantiques très sensibles (magnétométrie « SQUID ») ou des fréquencesmètres utilisent des circuits à jonctions Josephson.

10 Les circuits à jonctions Josephson constituent la pierre angulaire des dispositifs électroniques et logiques supraconducteurs « classiques » des applications citées ci-dessus. En outre, les jonctions Josephson sont les composants de base des nouveaux dispositifs supraconducteurs à bits quantiques (dits « Q-bits »), qui se sont révélés très prometteurs pour la réalisation de systèmes de calcul quantique. Il en
15 résulte que le perfectionnement des techniques de fabrication des jonctions Josephson est d'une grande importance dans de nombreux domaines d'application. En particulier, il s'agit des domaines où l'on peut utiliser des matériaux supraconducteurs à température critique (T_c) élevée, c'est-à-dire des dispositifs pouvant fonctionner à une température supérieure à ou proche de celle de l'azote
20 liquide, à pression ambiante normale. Ces matériaux supraconducteurs sont par exemple des oxydes complexes tels que des cuprates $TRBa_2Cu_3O_{7-x}$ (TR =terre rare) ou $La_{2-x}Sr_xCuO_4$, entre autres, pour lesquels la température critique dépend fortement de la concentration de porteurs de charge.

L'inconvénient de tels matériaux, du point de vue technologique, est qu'il est
25 difficile d'obtenir des réseaux de jonctions Josephson à propriétés physiques homogènes.

Le problème technologique le plus important relative à la fabrication des circuits à jonctions Josephson à supraconducteurs à T_c élevée est leur reproductibilité. Il existe actuellement deux procédés de fabrication de jonctions
30 Josephson. Le premier est du type à « modèle à rampe » nécessitant un grand nombre

d'étapes de fabrication (croissance d'un film supraconducteur, photolithographie de la structure à rampe, dépôt d'un matériau isolant formant barrière, croissance d'une deuxième électrode supraconductrice, etc). A cause de la nature multi-étapes de ce procédé de fabrication, et du caractère *ex situ* de ces étapes, on constate constamment
5 une grande dispersion des propriétés physiques de ces jonctions.

Le second procédé nécessite même un plus grand nombre d'étapes de fabrication de lithographie optique et à faisceau électronique et à irradiation ionique. Bien que ce procédé offre une meilleure reproductibilité des propriétés des circuits fabriqués, son inconvénient réside dans son coût du fait qu'il requiert un équipement
10 dernier cri onéreux de lithographie par faisceau électronique (à résolution meilleure que 30 nm), ainsi qu'un équipement d'implantation ionique également onéreux.

Les inconvénients de ces procédés connus ne permettent pas de les mettre en œuvre de façon industrielle. Enfin, l'inconvénient le plus important est que, du fait que les circuits à jonctions Josephson comportent typiquement plusieurs centaines de
15 tels circuits, le mauvais fonctionnement d'une seule jonction d'un circuit peut dégrader le fonctionnement de tout ce circuit. De plus, aucun de ces deux procédés ne permet ni de réparer ni de reconfigurer les circuits.

La présente invention a pour objet un circuit à jonctions Josephson à structure
20 hybride supraconducteur / ferroélectrique, présentant des caractéristiques facilement reproductibles, ne nécessitant pas de températures de fonctionnement trop basses, qui puisse être facilement réparable et pouvant être facilement fabriqué, même en grand nombre sur une même « puce ». Elle a aussi pour objet un réseau de tels circuits à jonctions Josephson dont les différents éléments aient des propriétés physiques
25 homogènes, ainsi qu'un procédé de fabrication d'un tel circuit.

Le circuit conforme à l'invention est caractérisé en ce qu'il comporte sur un substrat un film mince supraconducteur et un film mince ferroélectrique, le matériau du film supraconducteur étant un matériau dont la température critique est étroitement liée à sa concentration en porteurs de charges, et le film mince
30 ferroélectrique en un matériau polarisable localement, à échelle submicronique, dans

lequel a été induite une polarisation locale, et que le circuit est utilisé à température inférieure à la température critique du film supraconducteur .

Les matériaux ainsi utilisés par l'invention présentent un avantage très important qui est la possibilité d'écrire et d'effacer à volonté sur la même « puce » de circuit intégré des circuits ou des parties de circuits évolutifs, et ce, *a priori* un nombre illimité de fois. On obtient ainsi une grande souplesse d'utilisation des puces, sur chacune desquelles on peut former et modifier à volonté des circuits à fonctions très différentes en réécrivant ou en modifiant une partie ou la totalité des circuits déjà définis sur cette puce.

La présente invention sera mieux comprise à la lecture de la description détaillée d'un mode de réalisation, pris à titre d'exemple non limitatif et illustré par le dessin annexé, sur lequel :

- la figure 1 est un schéma simplifié en coupe d'un élément de circuit conforme à l'invention,
- la figure 2 est un schéma simplifié montrant la façon d'appliquer une polarisation locale à l'élément de circuit de la figure 1, et
- la figure 3 est un schéma simplifié montrant un effet de l'application d'une polarisation locale au circuit de la figure 1 comme réalisé selon le procédé schématisé en figure 2, et
- la figure 4 est une vue schématique en coupe selon IV-IV de la figure 3.

On a schématisé en figure 1 un composant élémentaire du circuit de l'invention. Ce composant comporte essentiellement une structure bicouche hybride à deux films minces. Sur un substrat isolant 1, on forme par croissance épitaxiale d'abord un film supraconducteur 2, puis un film ferroélectrique 3. Le film 2 a typiquement une épaisseur inférieure à environ 10 nm, tandis que le film 3 a typiquement une épaisseur supérieure à environ 3 nm. Le film ferroélectrique est par exemple un des matériaux suivants : BaTiO_3 , $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$, BiFeO_3 ...

Selon l'invention, le matériau supraconducteur est un matériau dont la température critique est étroitement liée à sa concentration en porteurs de charges. Ce matériau est par exemple un matériau à base d'oxydes complexes supraconducteurs tel qu'un des matériaux connus cités ci-dessus.

5 Le film mince ferroélectrique 3 est constitué d'un matériau qui doit pouvoir être polarisable localement (à échelle submicronique), de façon à pouvoir y générer une structure de domaines ferroélectriques. Comme schématisé en figure 2, on peut induire une polarisation locale du film ferroélectrique (référéncé 3' à la suite de cette polarisation), par exemple à l'aide de la pointe 4 d'un microscope à force atomique,
10 en appliquant une tension V suffisamment élevée, typiquement d'environ 10 V ou plus, entre la pointe 4, appuyée sur la face supérieure de la structure bicouche, et une électrode (non représentée) reliée au film supraconducteur 2. Cette électrode peut par exemple traverser le film 3, dans un coin de la structure, en étant électriquement isolée de ce film 3. Comme schématisé sur la figure 2, il se forme dans la couche 3',
15 entre la pointe 4 et le film supraconducteur 2, un canal étroit 3'' dont la polarisation est inverse de celle du reste de la couche 3'.

Le film supraconducteur est également influencé par cette polarisation du film ferroélectrique, d'une façon décrite ci-dessous en référence à la figure 3, et est référéncé 2' dans son ensemble en figures 2 et 3.

20 En variante (non représentée sur le dessin), si l'on emploie un matériau multiferroïque à propriétés magnétoélectriques (tel que BiFeO_3 , BiMnO_3 , TbMnO_3 , etc), la polarisation diélectrique peut être induite par application locale d'un champ magnétique. De façon avantageuse, ce champ magnétique est appliqué de la même façon que le champ d'écriture d'un disque dur d'ordinateur.

25 La structure des domaines ferroélectriques crée une modulation spatiale de la température critique dans le film supraconducteur à cause de la modulation de la concentration en porteurs de charges, cette modulation étant induite par le champ électrique de la couche ferroélectrique.

En particulier, selon l'invention, et ainsi que schématisé en figure 3, on
30 choisit une structure à domaines ferroélectriques de façon à former dans la couche 2', lors de l'application d'une tension V (comme indiqué en figure 2), deux régions

supraconductrices 5 et 6, ayant respectivement la même température critique $T_C = T_A$ et qui sont séparées l'une de l'autre par un canal central étroit 7 dont la largeur est de quelques dizaines de nm. Ce canal 7 prolonge le canal 3'' formé dans la couche 3'. La température critique T_C' du canal 7 est abaissée à une valeur telle que $T_C' = T_B < T_A$.

5 Lorsque la structure de la figure 3 fonctionne dans un environnement à une température T telle que $T_B < T < T_A$, il se forme une jonction Josephson. Cette jonction couple par effet Josephson les deux régions supraconductrices 5 et 6 de température critique $T_C = T_A$ à travers la région 7 dont la température critique est $T_C' = T_B$ (avec $T_B < T_A$).

10 Egalement selon l'invention, on peut former des circuits et réseaux à jonctions Josephson à la demande en induisant une structure de domaines ferroélectriques correspondante dans la structure film ferroélectrique 3'.

En conclusion, le dispositif de l'invention présente les avantages suivants :

15 - Toutes les jonctions formées sur une même puce ont des propriétés physiques similaires (température et courant critiques, résistance de la jonction, grâce au fait que l'homogénéité des jonctions ne dépend que de l'homogénéité des films qui peut être contrôlée pendant la croissance des films. Le procédé de l'invention pour fabriquer les jonctions ne comporte pas d'étapes de lithographie ou de processus

20 de déposition *ex situ*, qui entraînent généralement des dispersions de caractéristiques.

- Etant donné que la géométrie de la structure des domaines ferroélectriques peut être effacée et réécrite de façon réversible, la fonctionnalité particulière du circuit à jonctions Josephson ainsi

25 induite peut être modifiée de façon réversible à volonté. Il en résulte que le circuit de l'invention peut être reconfiguré et reprogrammé.

Si, par accident, une ou plusieurs des jonctions d'un circuit ne fonctionnaient pas correctement, elles peuvent être réparées par re-

30 polarisation de la zone affectée, et le circuit est alors de nouveau opérationnel. Donc, le circuit de l'invention est réparable.

REVENDEICATIONS

1. Circuit à jonctions Josephson à structure hybride supraconducteur / ferroélectrique, caractérisé en ce qu'il comporte sur un substrat (1) un film mince supraconducteur (2) et un film mince ferroélectrique (3), le matériau du film supraconducteur étant un matériau dont la température critique est étroitement liée à sa concentration en porteurs de charges, et le film mince ferroélectrique en un matériau polarisable localement, à échelle submicronique, dans lequel a été induite une polarisation locale, et que le circuit est utilisé à une température inférieure à la température critique du film supraconducteur .
2. Circuit selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'épaisseur du film supraconducteur est inférieure à environ 10 nm et que celle du film ferroélectrique est supérieure à environ 3 nm.
3. Procédé de réalisation d'un circuit selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les deux films minces sont formés par croissance épitaxiale et que la polarisation locale du film mince ferroélectrique est obtenue en appliquant une tension (V) entre une pointe (4), appuyée sur la face supérieure de la structure bicouche, et le substrat de cette structure bicouche.
4. Procédé de réalisation d'un circuit selon la revendication 4, caractérisé en ce que la tension est d'environ 10 V au moins.
5. Procédé de réalisation d'un circuit selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que les deux films minces sont formés par croissance épitaxiale, que le film mince ferroélectrique est en matériau multiferroïque à propriétés magnétoélectriques, et que la polarisation locale du film mince ferroélectrique est induite par application locale d'un champ magnétique.

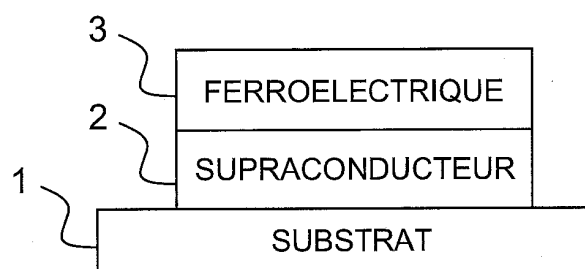


FIG.1

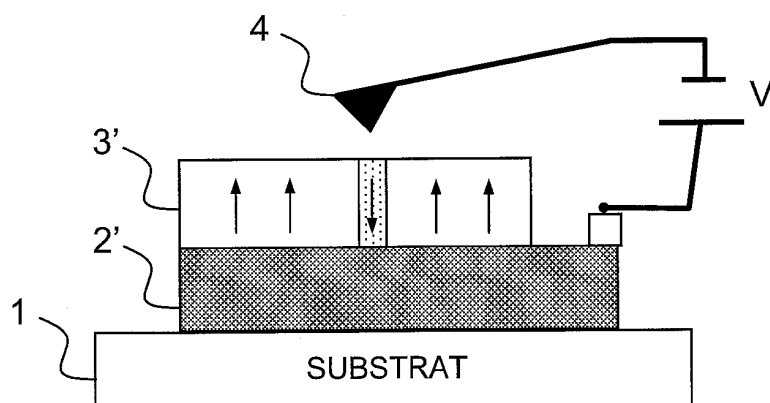


FIG.2

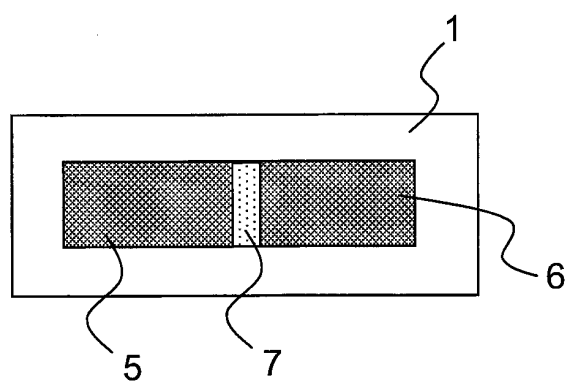
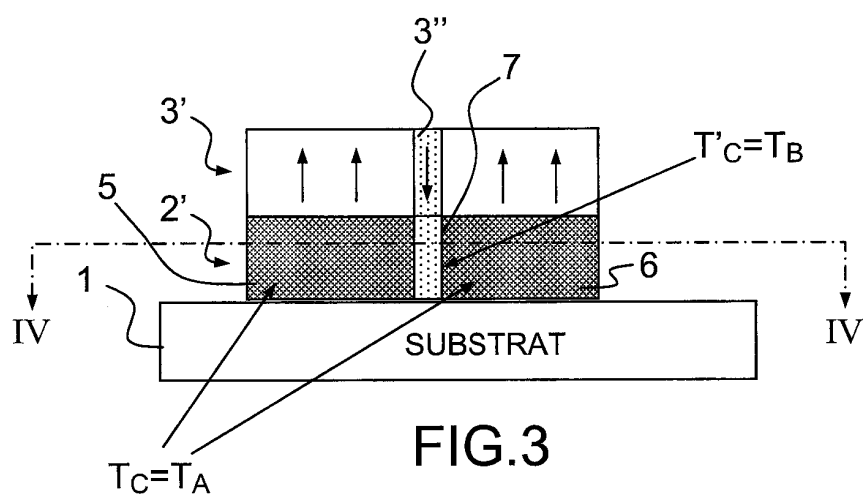


FIG. 4



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 734862
FR 0906402

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
Y	US 2002/180006 A1 (FRANZ MARCEL [CA] ET AL) 5 décembre 2002 (2002-12-05) * alinéas [0002], [0004], [0015], [0017], [0020], [0033], [0037]; figures 1, 2a-2e *	1-5	H01L39/24
Y	----- TAKAHASHI K S ET AL: "Electrostatic modulation of the electronic properties of Nb-doped SrTiO ₃ superconducting films" APPLIED PHYSICS LETTERS, AIP, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, MELVILLE, NY, US LNKD- DOI:10.1063/1.1667279, vol. 84, no. 10, 8 mars 2004 (2004-03-08), pages 1722-1724, XP012060724 ISSN: 0003-6951 * page 1722, colonne 1, ligne 26-29 * * page 1723, colonne 1, ligne 16-22 * * figure 1b *	3,4	
Y	----- JAMES A HUTCHBY ET AL: "Nanoelectronics for Memory, Logic, and Information-Processing Architectures Could Possibly Extend the Time Frame of the ITRS Beyond CMOS" IEEE CIRCUITS AND DEVICES MAGAZINE, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 18, no. 2, 1 mars 2002 (2002-03-01), pages 28-41, XP011092716 ISSN: 8755-3996 * page 34, colonne 2, alinéa 3 - page 35, colonne 1 * ----- -/--	1,2	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) H01L G06N G01R
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
22 juillet 2010		Meul, Hans	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons ----- & : membre de la même famille, document correspondant			



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 734862
FR 0906402

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
Y	FIEBIG M ET AL: "Current trends of the magnetoelectric effect" THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL B ; CONDENSED MATTER PHYSICS, EDP SCIENCES, LE LNKD- DOI:10.1140/EPJB/E2009-00266-4, vol. 71, no. 3, 13 octobre 2009 (2009-10-13), pages 293-297, XP019743188 ISSN: 1434-6036 * page 293, colonne 1, ligne 21-29 * * page 294, colonne 1, ligne 11-37 * * page 295, colonne 2, ligne 9-15 * -----	5	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
22 juillet 2010		Meul, Hans	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 734862
FR 0906402

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
Y	US 2002/180006 A1 (FRANZ MARCEL [CA] ET AL) 5 décembre 2002 (2002-12-05) * alinéas [0002], [0004], [0015], [0017], [0020], [0033], [0037]; figures 1, 2a-2e *	1-5	H01L39/24
Y	----- TAKAHASHI K S ET AL: "Electrostatic modulation of the electronic properties of Nb-doped SrTiO ₃ superconducting films" APPLIED PHYSICS LETTERS, AIP, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, MELVILLE, NY, US LNKD- DOI:10.1063/1.1667279, vol. 84, no. 10, 8 mars 2004 (2004-03-08), pages 1722-1724, XP012060724 ISSN: 0003-6951 * page 1722, colonne 1, ligne 26-29 * * page 1723, colonne 1, ligne 16-22 * * figure 1b *	3,4	
Y	----- JAMES A HUTCHBY ET AL: "Nanoelectronics for Memory, Logic, and Information-Processing Architectures Could Possibly Extend the Time Frame of the ITRS Beyond CMOS" IEEE CIRCUITS AND DEVICES MAGAZINE, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 18, no. 2, 1 mars 2002 (2002-03-01), pages 28-41, XP011092716 ISSN: 8755-3996 * page 34, colonne 2, alinéa 3 - page 35, colonne 1 * ----- -/--	1,2	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) H01L G06N G01R
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
22 juillet 2010		Meul, Hans	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons ----- & : membre de la même famille, document correspondant			



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 734862
FR 0906402

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
Y	FIEBIG M ET AL: "Current trends of the magnetoelectric effect" THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL B ; CONDENSED MATTER PHYSICS, EDP SCIENCES, LE LNKD- DOI:10.1140/EPJB/E2009-00266-4, vol. 71, no. 3, 13 octobre 2009 (2009-10-13), pages 293-297, XP019743188 ISSN: 1434-6036 * page 293, colonne 1, ligne 21-29 * * page 294, colonne 1, ligne 11-37 * * page 295, colonne 2, ligne 9-15 * -----	5	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
22 juillet 2010		Meul, Hans	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

