



(51) Classification internationale des brevets :
H01L 21/335 (2006.01) H01L 29/45 (2006.01)
H01L 29/06 (2006.01) H01L 29/775 (2006.01)
H01L 29/08 (2006.01)

SPATHIS, Panayotis [FR/FR]; 32 avenue Laplace,
F-94110 Arcueil (FR).

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2011/061924

(74) Mandataires : AUGARDE, Eric et al.; BREVALEX, 56
boulevard de l'Embouchure, B.P. 27519, F-31075
TOULOUSE Cedex 2 (FR).

(22) Date de dépôt international :
13 juillet 2011 (13.07.2011)

(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.

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
10 55847 19 juillet 2010 (19.07.2010) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :
Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies
alternatives [FR/FR]; 25, rue Leblanc, Bâtiment "Le
Ponant D", F-75015 Paris (FR).

(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, RS, SE, SI, SK,

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) :
MONGILLO, Massimo [IT/FR]; 24 rue Amédée Morel,
F-38000 Grenoble (FR). DE FRANCESCHI, Silvano
[IT/FR]; 88 cours Jean Jaurès, F-38000 Grenoble (FR).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : DEVICE AND PROCESS FOR FORMING, ON A NANOWIRE MADE OF A SEMICONDUCTOR, AN ALLOY OF THIS SEMICONDUCTOR WITH A METAL OR METALLOID

(54) Titre : DISPOSITIF ET PROCÉDÉ POUR FORMER SUR UN NANOFIL EN SEMI-CONDUCTEUR UN ALLIAGE DE CE SEMI-CONDUCTEUR AVEC UN MÉTAL OU UN MÉTALLOÏDE

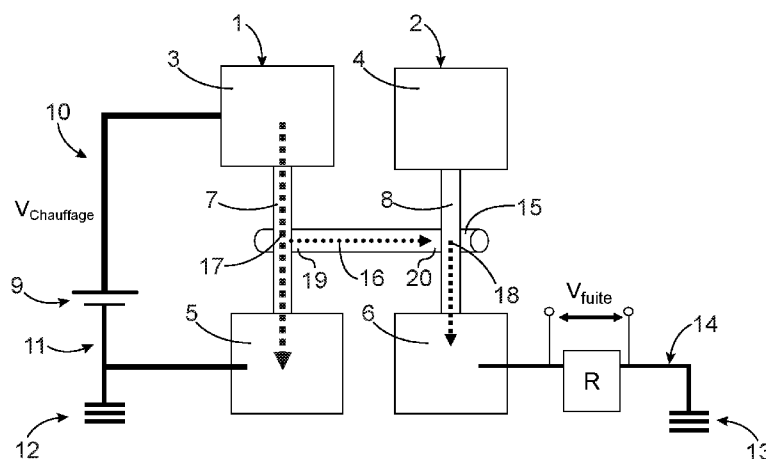


FIG. 2

(57) Abstract : Device for forming, on a nanowire made of a semiconductor, an alloy of this semiconductor with a metal or metalloid by bringing this nanowire into contact with electrically conductive metal or metalloid probes and Joule heating the nanowire at the points of contact with the probes so as to form an alloy such as a silicide. Application to the production of controlled-channel-length metal-silicide transistors.

(57) Abrégé : Dispositif pour former sur un nanofil en semi-conducteur, un alliage de ce semi-conducteur avec un métal ou un métalloïde pour mise en contact de ce nanofil avec des sondes électriquement conductrices en métal ou métalloïde provoquant un échauffement par effet Joule du nanofil aux points de contact avec ces sondes et formation de l'alliage tel qu'un siliciure. Application à la préparation de transistors à siliciures métalliques à longueur de canal contrôlée.

WO 2012/010473 A1



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

— avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues (règle 48.2.h)

Publiée :

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

DISPOSITIF ET PROCÉDÉ POUR FORMER SUR UN NANOFIL EN
SEMI-CONDUCTEUR UN ALLIAGE DE CE SEMI-CONDUCTEUR AVEC
UN MÉTAL OU UN MÉTALLOÏDE.

5

DESCRIPTION

DOMAINE TECHNIQUE

L'invention a trait à un dispositif pour former sur des nanofils en semi-conducteur un alliage de ce
10 semi-conducteur avec un métal ou un métalloïde.

L'invention a trait, en particulier, à un dispositif pour former des siliciures de métaux tels que le nickel sur des nanofils de silicium.

L'invention a également trait à un procédé pour
15 former sur des nanofils en semi-conducteur un alliage de ce semi-conducteur avec un métal ou un métalloïde.

Le dispositif et le procédé selon l'invention permettent en particulier de former sur des nanofils en semi-conducteur des transistors avec des contacts
20 métalliques, dont on peut contrôler la longueur du canal.

Le domaine technique de l'invention peut être défini de manière générale comme celui de la préparation de dispositifs à base de nanofils en semi-
25 conducteur, par exemple en silicium, pourvus de contacts en alliage de ce semi-conducteur avec un métal ou un métalloïde, par exemple en siliciure de métal.

De tels nanofils trouvent leur application dans de nombreux dispositifs électroniques et opto-
30 électroniques, notamment dans les transistors à effet de champ (« FET » ou « Field Effect Transistors » en langue anglaise) et plus particulièrement dans les

transistors à effet de champ à structure métal-oxyde-semi-conducteur (« MOSFET » ou « Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor »).

5 ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE

Les nanofils de silicium préparés par le procédé de dépôt chimique en phase vapeur (« CVD » ou « Chemical Vapour Deposition » en langue anglaise) ont fait l'objet d'un intérêt considérable ces dernières
10 années pour leur rôle futur en tant que blocs d'assemblages nanométriques pour des dispositifs fonctionnels tels que les transistors à effet de champ, les nanophotodétecteurs, les détecteurs, et les circuits logiques.

15 La « International Technology Roadmap for Semiconductor » (ITRS) prévoit que les nanofils de silicium remplaceront les "MOSFETs" classiques du fait de leur extensibilité et de leur densité d'intégration.

Un transistor à effet de champ classique est un
20 dispositif à trois électrodes dans lequel le courant qui circule depuis la source vers le drain est commandé par le potentiel à l'électrode grille.

Les régions de source et de drain sont fortement dopées, avec un dopage qui est l'inverse de
25 celui du substrat.

L'électrode grille est séparée du canal par une mince couche isolante. Lorsqu'une tension de polarisation suffisamment importante est appliquée à l'électrode grille, la surface du substrat est inversée
30 pour former un canal conducteur avec une forte densité

de porteurs, et en conséquence un courant commence à circuler entre l'électrode source et l'électrode drain.

Le schéma de procédé normal pour la fabrication d'un « MOSFET » nécessite un fort dopage des contacts de source et de drain pour permettre une injection efficace des porteurs dans le canal.

Le dopage est suivi par une activation des dopants à haute température pour faire en sorte que l'ionisation soit totale.

10 A l'heure actuelle, il existe un intérêt croissant pour remplacer la région fortement dopée des « MOSFETs » par des siliciures métalliques afin de diminuer les résistances parasites élevées associées aux contacts.

15 Le schéma de contact source/drain qui utilise des siliciures nécessite un faible apport thermique, présente de manière inhérente une faible résistance, et la jonction métal-canal est abrupte au niveau atomique ce qui a pour conséquence une meilleure extensibilité du dispositif.

La formation du contact en siliciure de métal est normalement réalisée en chauffant le métal en contact avec le semi-conducteur.

25 Sur la Figure 1, on montre un nanofil de silicium en contact avec une électrode en nickel. Après un recuit thermique dans un four à une température d'environ 500°C, on induit la pénétration du métal à l'intérieur du nanofil pour former ainsi une phase métallique de nickel et de silicium, c'est-à-dire un siliciure de métal. Cela est confirmé par l'observation de la Figure 1 où les régions plus brillantes du

nanofil au voisinage du contact correspondent à la phase de siliciure de nickel.

Pour une température donnée, la longueur de la partie siliciée varie selon la quantité de métal qui recouvre le nanofil, le diamètre du nanofil et la durée du traitement de recuit.

Cependant, de manière inhérente, le traitement de recuit thermique réalisé dans un four n'est pas satisfaisant pour ce qui est du contrôle de la longueur de la partie siliciée, principalement à cause de la variation du diamètre du nanofil et de la qualité du film de métal déposé sur le nanofil.

Le document EP-A1-0 562 996 décrit un dispositif « antifuse » électriquement programmable qui comprend un substrat en silicium ; une jonction P-N formée dans ledit substrat en silicium ; des moyens isolants par exemple en silice, pour isoler électriquement et thermiquement la jonction P-N dans ledit substrat en silicium, la jonction P-N étant exposée au travers de ces moyens isolants, par exemple au moyen d'un trou prévu dans ces moyens isolants ; une couche métallique en contact avec la jonction P-N, qui réagit avec le silicium pour former des siliciures sur la jonction P-N. La couche métallique peut être en Ti, Cr, W, Mo ou Ta.

Dans ce document, le substrat en silicium est un substrat massif et non un substrat constitué par des nanofils de silicium.

Ce document concerne spécifiquement la préparation de dispositifs « antifuse », et ne concerne absolument pas la préparation de transistors à nanofils

de silicium qui sont les dispositifs que l'on cherche plus particulièrement à préparer selon la présente invention.

Il existe donc au regard de ce qui précède un
5 besoin non encore satisfait pour un dispositif et un procédé pour former sur des nanofils en semi-conducteur, par exemple en silicium, un alliage de ce semi-conducteur avec un métal ou un metalloïde, par exemple un siliciure de métal ou de metalloïde, qui
10 permette de réguler, contrôler, de manière fiable, précise et reproductible la formation de cet alliage.

Il existe notamment un besoin pour un tel dispositif et un tel procédé qui permettent de contrôler de manière, fiable, précise et reproductible
15 la longueur, et éventuellement la profondeur, de la partie du nanofil de semi-conducteur qui est transformée en alliage de ce semi-conducteur, par exemple en siliciure de métal ou de metalloïde.

Il existe plus précisément un besoin pour un
20 tel dispositif et un tel procédé qui assurent un tel contrôle fiable et précis, quelles que soient les caractéristiques du métal ou du metalloïde (par exemple qualité, épaisseur d'un film de celui-ci) au contact du nanofil dans le but de former l'alliage, et quelles que
25 soient les caractéristiques du nanofil, par exemple son diamètre.

Le but de l'invention est de fournir un dispositif et un procédé pour former sur des nanofils en semi-conducteur, par exemple en silicium, un alliage
30 de ce semi-conducteur avec un métal ou un metalloïde,

qui répondent entre autres aux besoins énumérés plus haut.

Le but de l'invention est encore de fournir un tel dispositif et un tel procédé qui ne présentent pas les inconvénients, défauts, limitations et désavantages des dispositifs et procédés de l'art antérieur et qui résolvent les problèmes des dispositifs et procédés de l'art antérieur.

10 EXPOSÉ DE L'INVENTION

Ce but, et d'autres encore, sont atteints, conformément à l'invention, par un dispositif pour former sur un nanofil en un semi-conducteur, un alliage de ce semi-conducteur avec un métal ou un métalloïde, ledit dispositif comprenant :

- une première bande électriquement conductrice en un métal ou un métalloïde apte à former un alliage avec le semi-conducteur du nanofil, et une seconde bande électriquement conductrice en un métal ou un métalloïde apte à former un alliage avec le semi-conducteur du nanofil, espacées l'une de l'autre, la première et la seconde bandes électriquement conductrices formant une partie rétrécie respectivement d'une première ligne électriquement conductrice et d'une seconde ligne électriquement conductrice, lesdites première et seconde lignes électriquement conductrices comprenant chacune une première extrémité et une seconde extrémité, la partie centrale de la première bande électriquement conductrice étant apte à être mise en contact avec une première zone de la surface du nanofil et la partie centrale de la seconde

bande électriquement conductrice étant apte à être mise en contact avec une deuxième zone de la surface du nanofil, espacée de la première zone dans le sens de la longueur du nanofil ;

5 - des moyens pour appliquer une différence de potentiel, entre la première extrémité de la première ligne électriquement conductrice et la seconde extrémité de la première ligne électriquement conductrice et faire passer un courant depuis la
10 première extrémité vers la seconde extrémité de la première ligne électriquement conductrice, et des moyens pour relier la seconde extrémité de la seconde ligne électriquement conductrice à la terre, lesdits moyens comprenant une résistance R ;

15 - éventuellement, des moyens pour appliquer une différence de potentiel, entre la première extrémité de la seconde ligne électriquement conductrice et la seconde extrémité de la seconde ligne électriquement conductrice lorsqu'aucune différence de
20 potentiel n'est appliquée, entre la première extrémité de la première ligne électriquement conductrice et la seconde extrémité de la première ligne électriquement conductrice et faire passer un courant depuis la première extrémité vers la seconde extrémité de la
25 seconde ligne électriquement conductrice, et éventuellement des moyens pour relier la seconde extrémité de la première ligne électriquement conductrice à la terre, lesdits moyens comprenant une résistance R' ;

- des moyens pour mesurer une différence de potentiel, dite première différence de potentiel de fuite de part et d'autre de la résistance R ;

5 - éventuellement, des moyens pour mesurer une différence de potentiel, dite deuxième différence de potentiel de fuite de part et d'autre de la résistance R' ;

10 - des moyens pour appliquer une différence de potentiel, dite première différence de potentiel de polarisation entre la première zone de la surface du nanofil et la deuxième zone de la surface du nanofil, dans le sens de la longueur du nanofil ;

15 - éventuellement, des moyens pour appliquer une différence de potentiel, dite deuxième différence de potentiel de polarisation entre la deuxième zone de la surface du nanofil et la première zone de la surface du nanofil, dans le sens de la longueur du nanofil lorsque la première différence de potentiel de polarisation n'est pas appliquée.

20 Les première et seconde bandes conductrices peuvent aussi être désignées par la dénomination anglaise de « stripline ».

25 Par « partie rétrécie », on entend généralement que cette partie présente une section, généralement une section transversale, inférieure à la section moyenne du reste de la ligne électriquement conductrice.

Avantageusement, la première et la seconde bandes électriquement conductrices peuvent être parallèles.

Avantageusement, la première et la seconde bandes électriquement conductrices ont chacune une longueur de 1 à 5 μm , par exemple de 3 μm .

Avantageusement, la première et la seconde bandes électriquement conductrices sont espacées l'une de l'autre de 100 à 300 nm, par exemple de 200 nm à 300 nm, de préférence de 200 nm.

La première et la seconde bandes électriquement conductrices peuvent être en tout métal ou métalloïde apte à former des alliages avec le semi-conducteur qui compose le nanofil.

Avantageusement, la première et la seconde bandes électriquement conductrices peuvent être en nickel ou en platine.

Avantageusement, les moyens pour appliquer une différence de potentiel, entre la première extrémité de la première ligne électriquement conductrice et la seconde extrémité de la première ligne électriquement conductrice, et les moyens éventuels pour appliquer une différence de potentiel, entre la première extrémité de la seconde ligne électriquement conductrice et la seconde extrémité de la seconde ligne électriquement conductrice peuvent comporter des moyens pour augmenter ou diminuer cette (ces) différence(s) de potentiel de manière continue ou par incrément, de manière manuelle ou automatique, par exemple en fonction de la valeur mesurée de la première différence de potentiel de fuite, respectivement de la deuxième différence de potentiel de fuite.

Avantageusement, les moyens pour appliquer une différence de potentiel, entre la première extrémité de

la première ligne électriquement conductrice et la seconde extrémité de la première ligne électriquement conductrice et les moyens pour appliquer une différence de potentiel, dite première différence de potentiel de polarisation entre la première zone de la surface du nanofil et la deuxième zone de la surface du nanofil, dans le sens de la longueur du nanofil sont constitués par un même premier générateur de tension.

Avantageusement, les moyens éventuels pour appliquer une différence de potentiel, entre la première extrémité de la seconde ligne électriquement conductrice et la seconde extrémité de la seconde ligne électriquement conductrice, et les moyens éventuels pour appliquer une différence de potentiel, dite deuxième différence de potentiel de polarisation entre la deuxième zone de la surface du nanofil et la première zone de la surface du nanofil, dans le sens de la longueur du nanofil sont constitués par un même deuxième générateur de tension.

Avantageusement, ledit premier et ledit deuxième générateurs de tension sont remplacés par un seul générateur de tension (sont constitués par un seul et même générateur) qui peut appliquer une différence de potentiel, entre la première extrémité de la première ligne électriquement conductrice et la seconde extrémité de la première ligne électriquement conductrice et une différence de potentiel, entre la première zone de la surface du nanofil et la deuxième zone de la surface du nanofil, dans le sens de la longueur du nanofil, ou bien qui peut appliquer une différence de potentiel, entre la première extrémité de

la seconde ligne électriquement conductrice et la seconde extrémité de la seconde ligne électriquement conductrice, et une différence de potentiel, entre la deuxième zone de la surface du nanofil et la première zone de la surface du nanofil, dans le sens de la longueur du nanofil.

Avantageusement, la première ligne électriquement conductrice et la seconde ligne électriquement conductrice peuvent chacune comprendre plusieurs premières bandes électriquement conductrices et secondes bandes électriquement conductrices.

Il est ainsi possible de traiter simultanément plusieurs nanofils.

Si toutes les bandes électriquement conductrices formées le long d'une même ligne électriquement conductrice (par exemple la première ligne électriquement conductrice) et tous les nanofils à traiter ont la même résistivité alors il est possible d'appliquer une seule différence de potentiel entre la première extrémité de cette ligne électriquement conductrice et la seconde extrémité de cette ligne électriquement conductrice

Le dispositif selon l'invention n'a pas été décrit ou suggéré dans l'art antérieur.

Le dispositif selon l'invention répond à l'ensemble des besoins énumérés plus haut pour un tel dispositif et apporte une solution aux problèmes posés par les dispositifs de l'art antérieur.

Le dispositif selon l'invention permet notamment de contrôler avec précision, fiabilité, le courant de fuite et donc la formation de l'alliage de

semi-conducteur, par exemple de siliciure de métal, et en particulier la longueur de la partie du nanofil de semi-conducteur, par exemple de silicium, transformée en alliage de métal, par exemple en siliciure de métal
5 ou de métalloïde.

Le dispositif selon l'invention comprend en tant qu'éléments essentiels deux bandes électriquement conductrices (« striplines »).

Chacune de ces deux bandes électriquement
10 conductrices a un rôle défini.

La première bande électriquement conductrice est utilisée pour former l'alliage de semi-conducteur et de métal ou de métalloïde, par exemple de siliciure de métal ou de métalloïde.

15 La première bande électriquement conductrice est reliée à des moyens qui permettent de faire passer un courant depuis sa première extrémité vers sa seconde extrémité.

La première bande électriquement conductrice
20 forme un rétrécissement, une partie rétrécie, resserrée, ou constriction dans la première ligne électriquement conductrice. Cette partie rétrécie, restreint le passage du courant depuis la première extrémité de la première ligne conductrice vers la
25 seconde extrémité de la première ligne électriquement conductrice. On pourrait aussi dire que cette partie rétrécie gêne, limite localement le passage de ce courant.

Du fait que l'intensité du courant reste la
30 même lorsque le courant passe dans cette partie rétrécie, il en résulte une augmentation de la densité

de courant dans cette partie rétrécie, ce qui cause localement, dans cette partie rétrécie, un échauffement par effet Joule de la bande.

En d'autres termes, la différence de potentiel appliquée chute principalement le long de cette partie rétrécie et, en conséquence, la température de la première ligne électriquement conductrice est plus élevée au niveau de cette partie retrécie.

L'échauffement de la première bande électriquement conductrice est en général maximum dans la partie centrale de la première bande électriquement conductrice, et, plus précisément encore, au milieu de celle-ci.

Autrement dit, le point le plus chaud de la première bande électriquement conductrice se situe dans la partie centrale, médiane de cette bande électriquement conductrice, et plus précisément encore au milieu de celle-ci.

Cette partie centrale de la première bande électriquement conductrice, est en un métal ou métalloïde, par exemple le nickel qui est apte à former un alliage avec le semi-conducteur du nanofil, et cette partie centrale est apte à être mise en contact avec une première zone de la surface d'un nanofil en semi-conducteur (par exemple en silicium) afin que se produise ainsi, lors de la mise en contact du nanofil et de la première bande électriquement conductrice, un chauffage local du contact et la formation d'un alliage du semi-conducteur et du métal ou métalloïde, par exemple la formation d'un siliciure de métal.

La seconde ligne électriquement conductrice (2) n'est pas, lors de la première étape du procédé selon l'invention, reliée à des moyens qui permettent de faire passer un courant depuis sa première extrémité
5 vers sa seconde extrémité.

En effet lors de la première étape, il n'est pas nécessaire de relier la première (4) et la seconde extrémités (6) de la seconde ligne électriquement conductrice (2) à des générateurs externes fournissant
10 un courant qui passe dans la ligne (2) (voir Figure 2).

Cette seconde ligne doit, lors de la première étape, seulement être reliée comme cela est montré sur la Figure 2, à la résistance R afin de pouvoir mesurer la différence de potentiel de fuite (V_{fuite}).

Lorsque ce potentiel de fuite a un saut, comme cela est montré sur la Figure 6, correspondant à un courant (courant de fuite) dans le nanofil de l'ordre de quelques nanoampères (dans le cas d'un nanofil non dopé), on sait alors que la formation de l'alliage par
15 exemple de l'alliage de silicium (« siliciuration ») a eu lieu au niveau de la première zone de la surface du nanofil (premier contact).
20

Bien sûr, pour la préparation d'un transistor, le rôle des première (1) et seconde (2) lignes électriquement conductrices est ensuite inversé comme cela est expliqué plus loin, et alors la ligne (2) sera reliée à des générateurs externes qui permettent de faire passer un courant depuis sa première extrémité
25 (4) vers sa seconde extrémité (6).

Lors de la première étape, la seconde extrémité
30 (6) de la seconde ligne électriquement conductrice (2)

est simplement reliée à la terre par des moyens qui comprennent une résistance en série (avec le nanofil lorsque celui-ci est présent) R ; des moyens étant prévus pour mesurer la différence de potentiel, dite première différence de potentiel de fuite de part et d'autre de la Résistance R.

La seconde bande électriquement conductrice et les moyens associés jouent donc alors un rôle de contrôle du courant de fuite, ce qui permet également, éventuellement de contrôler, commander ou réguler la pénétration du métal ou métalloïde dans le nanofil en semi-conducteur, par exemple en silicium et donc la longueur de la partie du nanofil transformée en alliage, par exemple en siliciure de métal.

L'invention concerne également un procédé pour former, sur au moins un nanofil en un semi-conducteur un alliage de ce semi-conducteur avec un métal ou métalloïde, dans lequel on réalise les étapes successives suivantes :

a) on dépose ledit au moins un nanofil en un semi-conducteur sur un substrat, par exemple une couche, en un matériau électriquement isolant, éventuellement disposé sur un autre substrat en un matériau différent dudit matériau électriquement isolant;

b) on met en contact une première zone de la surface du nanofil avec une partie centrale d'une première bande électriquement conductrice, en un métal ou un métalloïde apte à former un alliage avec le semi-conducteur du nanofil, formant une partie rétrécie entre une première extrémité et une seconde extrémité

d'une première ligne électriquement conductrice, et on met en contact une deuxième zone de la surface du nanofil, espacée de la première zone dans le sens de la longueur du nanofil avec une partie centrale d'une
5 seconde bande électriquement conductrice, en un métal ou un métalloïde apte à former un alliage avec le semi-conducteur du nanofil, formant une partie rétrécie entre une première extrémité et une seconde extrémité d'une seconde ligne électriquement conductrice ;

10 c) on applique une différence de potentiel dite première différence de potentiel de polarisation entre la première zone de la surface du nanofil et la deuxième zone de la surface du nanofil, dans le sens de la longueur du nanofil ;

15 d) on applique une différence de potentiel dite première différence de potentiel de chauffage, entre la première extrémité de la première ligne électriquement conductrice et la seconde extrémité de la première ligne électriquement conductrice, tout en
20 maintenant constante la première différence de potentiel de polarisation, et on mesure simultanément une différence de potentiel, dite première différence de potentiel de fuite, de part et d'autre d'une résistance R en série avec le nanofil, située entre la
25 seconde extrémité de la seconde ligne électriquement conductrice et la terre.

e) on augmente la première différence de potentiel de chauffage de manière continue ou par
incrément, de manière manuelle ou automatique,
30 généralement à partir d'une valeur voisine de zéro, jusqu'à ce que l'on observe un saut de la première

différence de potentiel de fuite indiquant que la première différence de potentiel de chauffage est alors suffisante pour provoquer un échauffement de la partie centrale de la première bande électriquement conductrice et de la première zone de la surface du nanofil, la diffusion du métal ou du métalloïde dans et le long du nanofil, et la formation de l'alliage.

Avantageusement, le semi-conducteur peut être le silicium, éventuellement dopé.

Bien que le procédé selon l'invention n'ait été mis en œuvre effectivement qu'avec des nanofils de silicium, l'homme du métier comprendra que le procédé selon l'invention peut également être mis en œuvre avec succès avec d'autres semi-conducteurs.

En fait, pour former des alliages métalliques avec des semi-conducteurs, il est nécessaire d'utiliser des traitements thermiques, tels que le recuit thermique rapide (« Rapid Thermal Annealing » en langue anglaise) ou le recuit au four (« Furnace annealing » en langue anglaise). Avec le procédé de l'invention, il est possible de produire la chaleur requise par chauffage par effet Joule.

Le procédé selon l'invention peut être mis en œuvre avec succès avec toutes sortes de nanofils quels que soient leurs diamètres ou tailles.

Avantageusement, les nanofils, peuvent avoir une longueur de 0,5 à 10 μm , de préférence de 1 à 10 μm , et un diamètre de 20 à 50 nm.

La nature chimique du substrat n'est pas importante, il doit seulement être isolant et résister

aux fortes températures voisines par exemple d'environ 500°C dues au chauffage par effet Joule.

Avantageusement, le substrat en un matériau électriquement isolant est une couche en silice éventuellement disposée sur un substrat en silicium fortement dopé ; un substrat, par exemple une couche en nitrure de silicium ; ou un substrat, par exemple une couche d'alumine.

Avantageusement, on peut déposer plusieurs nanofils sur le substrat en un matériau électriquement isolant, lesdits nanofils étant disposés de manière aléatoire, leur position étant repérée à l'aide de marques préalablement réalisées sur le substrat ; ou selon des structures, motifs ordonnés, par exemple sous la forme de rangées ordonnées de nanofils.

La première et la seconde bandes électriquement conductrices peuvent être en tout métal ou métalloïde apte à former des alliages avec des semi-conducteurs.

Avantageusement, la première et la seconde bandes électriquement conductrices peuvent être en nickel ou en platine.

Bien que le procédé selon l'invention n'ait été mis en œuvre effectivement qu'avec le nickel et le platine, l'homme du métier comprendra que le procédé selon l'invention peut également être mis en œuvre avec succès avec d'autres métaux ou métalloïdes aptes à former des alliages avec des semi-conducteurs.

Avantageusement, l'épaisseur de la couche du métal ou métalloïde doit être bien supérieure au diamètre du nanofil, par exemple une épaisseur de 80 à

120 nm est suffisante pour des nanofils de 20 nm de diamètre.

Avantageusement, en fonction de la première différence de potentiel de fuite mesurée, on modifie la première différence de potentiel de chauffage.

La différence de potentiel mesurée de part et d'autre de la résistance R, qui est appelée V_{fuite} , nous indique quel est le courant qui circule dans le nanofil pour une valeur donnée du courant qui passe dans la première bande électriquement conductrice (7) et de la différence de potentiel qui chute dans le nanofil entre les points (17) et (18) de la Figure 2.

A l'aide par exemple d'un amplificateur opérationnel, il est possible de découpler le courant de chauffage qui passe dans la première bande électriquement conductrice (7) du potentiel de polarisation qui est appliqué au nanofil entre les points (17) et (18) (ou plutôt entre les points (19) et (20)) montrés sur la Figure 2.

En d'autres termes, on peut maintenir fixe, par exemple à 1 Volt, la tension de polarisation entre les points (17) et (18) (ou plutôt (19) et (20)) de la Figure 2, tandis que l'on augmente le courant qui circule dans la première bande électriquement conductrice (7) jusqu'à ce que l'on mesure un courant dans la résistance R, par exemple de quelques nanoampères.

On peut noter que le courant de fuite dans la résistance R est indicatif, il change selon la chute de potentiel entre les points (17) et (18) sur la Figure 2.

Avantageusement, à l'issue de l'étape e), on réalise les étapes f), g), h) suivantes :

f) on applique une différence de potentiel dite deuxième différence de potentiel de polarisation
5 entre la deuxième zone de la surface du nanofil et la première zone de la surface du nanofil, dans le sens de la longueur du nanofil ;

g) on applique une différence de potentiel dite deuxième différence de potentiel de chauffage,
10 entre la première extrémité de la seconde ligne électriquement conductrice et la seconde extrémité de la seconde ligne électriquement conductrice, tout en maintenant constante la deuxième différence de potentiel de polarisation, et on mesure simultanément
15 une différence de potentiel, dite deuxième différence de potentiel de fuite, de part et d'autre d'une résistance R' en série avec le nanofil située entre la seconde extrémité de la première ligne électriquement conductrice et la terre ;

h) on augmente la deuxième différence de
20 potentiel de chauffage de manière continue ou par incrément, de manière manuelle ou automatique, généralement à partir d'une valeur voisine de zéro, jusqu'à ce que l'on observe un saut de la deuxième
25 différence de potentiel de fuite indiquant que la deuxième différence de potentiel de chauffage est alors suffisante pour provoquer un échauffement de la partie centrale de la seconde bande électriquement conductrice et de la deuxième zone de la surface du nanofil, la
30 diffusion du métal ou du métalloïde dans et le long du nanofil et la formation de l'alliage.

C'est lors de cette étape h) que l'on contrôle, maîtrise la longueur du canal du transistor.

En fait, grâce à une courbe d'étalonnage, telle que celle de la Figure 4, on peut connaître la longueur
5 du canal correspondant à une certaine valeur du courant de fuite mesuré dans la résistance R' ou R.

La Figure 4 montre la longueur du canal mesurée en fonction, du courant de fuite qui circule dans la résistance R ou R'.

10 Le courant de fuite est mesuré en polarisant le nanofil entre les points (18) et (17) (ou plutôt (20 et 19)) indiqués sur la Figure 2 avec une tension de polarisation constante, par exemple de 1 Volt.

Le potentiel de polarisation dans le nanofil
15 entre les points (18) et (17) est maintenu constant, fixe tandis que l'on augmente le courant de chauffage qui passe dans la bande électriquement conductrice (8) jusqu'à ce que l'on commence à mesurer un courant de fuite qui traverse la résistance R'.

20 Avantageusement, en fonction de la deuxième différence de potentiel de fuite mesurée, on peut modifier la deuxième différence de potentiel de chauffage.

Avantageusement, la première différence de
25 potentiel de chauffage et/ou la deuxième différence de potentiel de chauffage est(sont) modifiée(s) afin d'obtenir une première portion en alliage et/ou une deuxième portion en alliage de longueur(s) déterminée(s) le long du nanofil à partir
30 respectivement de la première zone de la surface du

nanofil et de la deuxième zone de la surface du nanofil.

Avantageusement, la portion en semiconducteur de la longueur du nanofil entre la première portion en alliage et la deuxième portion en alliage est le canal d'un transistor.

Avantageusement, on établit une courbe d'étalonnage qui donne pour chaque valeur du (des) courant(s) de fuite, la longueur du canal du transistor et on règle le premier et/ou le deuxième potentiel de chauffage de manière à obtenir la longueur de canal souhaitée.

Avantageusement, les bandes électriquement conductrices sont définies directement sur les nanofils, par exemple par un procédé de lithographie.

Le procédé selon l'invention n'a pas été décrit ou suggéré dans l'art antérieur.

Le procédé selon l'invention répond à l'ensemble des besoins énumérés plus haut pour un tel procédé et apporte une solution aux problèmes posés par les procédés de l'art antérieur.

On peut dire que le procédé selon l'invention présente notamment, de manière inhérente, tous les effets et avantages dus au fait qu'il est mis en œuvre avec le dispositif décrit plus haut.

Le procédé selon l'invention permet notamment de contrôler avec précision, fiabilité, le courant de fuite, et donc la formation de l'alliage tel que le siliciure de métal et en particulier la longueur et la profondeur de la partie du nanofil de silicium

transformée en alliage, par exemple en siliciure de métal.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description détaillée qui va suivre donnée à titre
5 illustratif et non limitatif, cette description étant faite en référence aux dessins joints dans lesquels :

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

- La Figure 1 est une microphotographie prise
10 au microscope électronique à balayage (MEB) d'un nanofil de silicium mis en contact avec une électrode en nickel et recuit dans un four à 500°C.

L'échelle représentée sur la Figure 1 est de 100 nm.

15 - La Figure 2 est une vue schématique du dessus d'un dispositif selon l'invention, pour la mise en œuvre du procédé selon l'invention.

- La Figure 3 est une vue schématique d'un transistor à nanofils préparé par le procédé selon
20 l'invention.

- La Figure 4 est un graphique sur lequel est porté en ordonnée le courant de fuite ("leakage current") (en nA) mesuré dans le nanofil, et sur lequel est porté en abscisse la longueur (en nm) du canal d'un
25 transistor à nanofil de silicium préparé par le procédé selon l'invention.

- La Figure 5 est une microphotographie, prise au microscope électronique à balayage qui montre un transistor à nanofil avec son canal, ses portions en
30 siliciure de nickel, et les deux bandes électriquement

conductrices (bande (1) et bande (2)) du dispositif mis en œuvre pour sa préparation.

L'échelle représentée sur la Figure 5 est de 200 nm.

5 - La Figure 6 est un graphique qui montre l'évolution dans le temps de la résistance normalisée de la bande (courbe A) et du courant de fuite circulant dans le nanofil (courbe B).

En ordonnée, à gauche, est portée la résistance normalisée, en ordonnée à droite est portée le courant de fuite (en A), et en abscisse est porté le temps.

10 - La Figure 7 est une microphotographie prise au microscope électronique à balayage d'un dispositif selon l'invention dans lequel est monté un nanofil de silicium qui a subi un traitement thermique par effet Joule réalisé sur les deux bandes.

L'échelle représentée sur la Figure 7 est de 200 nm.

20 - Les Figure 8A et 8B montrent une vue de dessus d'un substrat sur lequel sont disposés plusieurs nanofils et plusieurs dispositifs selon l'invention avec des lignes conductrices comprenant des parties rétrécies.

25 La Figure 8B est un agrandissement de la partie centrale de la Figure 8A.

L'échelle représentée sur la Figure 8A est de 200 μm et l'échelle représentée sur la Figure 8B est de 10 μm .

EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

Un dispositif selon l'invention est décrit sur la Figure 2.

Ce dispositif comprend une première ligne (1) 5 électriquement conductrice et une seconde ligne (2) électriquement conductrice.

Les deux lignes (1, 2) sont généralement placées dans un même plan horizontal.

Ces lignes (1, 2) présentent généralement une 10 section transversale rectangulaire ou carrée.

Par exemple, les lignes (1, 2) peuvent avoir une épaisseur, hauteur de 80 à 120 nm et une largeur de 5 à 10 μm

Ces lignes (1, 2) sont électriquement 15 conductrices et sont généralement constituées par un matériau électriquement conducteur qui est choisi parmi les métaux et métalloïdes, tels que le nickel ou le platine, apte à former des alliages métalliques avec des matériaux semi-conducteurs.

20 Comme on l'a précisé plus haut, bien que l'invention n'ait été mise en œuvre effectivement qu'avec le nickel et le platine, l'homme du métier comprendra que le procédé selon l'invention peut également être mis en œuvre avec succès avec d'autres 25 métaux ou métalloïdes aptes à former des alliages avec des semi-conducteurs.

La première (1) et la seconde (2) lignes électriquement conductrices comprennent chacune une première extrémité (3, 4) et une seconde extrémité (5, 30 6).

La première ligne électriquement conductrice (1) comprend une première bande conductrice (7) (aussi appelée « stripline » en langue anglaise) qui forme une partie rétrécie (7) entre la première extrémité (3) et la seconde extrémité (5) de la première ligne électriquement conductrice (1) ; et la seconde ligne électriquement conductrice (2) comprend une seconde bande électriquement conductrice (8) (aussi appelée « stripline » en langue anglaise) qui forme une partie rétrécie (8) entre la première extrémité (4) et la seconde extrémité (6) de la seconde ligne électriquement conductrice (2).

Par partie rétrécie (7, 8), on entend généralement que cette partie présente une section, généralement une section transversale inférieure au reste de la première (1) et de la seconde (2) lignes conductrices et plus précisément une section transversale inférieure à la section transversale de la première extrémité (3, 4) et de la seconde extrémité (5, 6) desdites lignes conductrices (1, 2).

A titre d'exemple, la section de la bande conductrice ou partie rétrécie (7) de la première ligne conductrice (1) peut être égale à de 0,01 à 0,1, de préférence 0,05 à 0,1 fois la section transversale de la première extrémité (3) et de la seconde extrémité (5) de la première ligne conductrice (1). Il en est de même pour la bande conductrice (8) de la seconde ligne électriquement conductrice (2).

Typiquement, la section des bandes électriquement conductrices (7, 8) peut être de 10^4 à

10^5 nm^2 alors que la section des lignes électriquement conductrices (1, 2) peut être de l'ordre de 10^6 nm^2 .

Les valeurs données pour ces sections sont
5 indicatives et ne sont données qu'à titre d'exemple. Elles correspondent aux dimensions typiques qui ont été utilisées dans les exemples.

Le point le plus important à retenir est le rapport entre la section de la bande (7)
10 (respectivement (8)) et la section de la ligne (1) (respectivement (2)) en (3) ou (5) (respectivement en (4) ou (6)).

Comme on l'a déjà indiqué plus haut, une valeur de ce rapport par exemple de 0,01 à 0,1, de préférence
15 de 0,05 à 0,1 semble être raisonnable.

Généralement, la première extrémité (3, 4) et la seconde extrémité (5, 6) de chacune des lignes électriquement conductrices (1, 2) ont une section supérieure à la partie rétrécie (7, 8) de chacune de
20 ces lignes car ces extrémités (3, 4, 5, 6) présentent comme cela est représenté sur la Figure 2, une largeur plus importante que la largeur de la partie rétrécie (7, 8) de chacune des lignes électriquement conductrices (1, 2) tandis que la hauteur, épaisseur
25 des première (3, 4) et seconde extrémités (5, 6) et de la partie rétrécie (7, 8) est généralement identique.

Par exemple, pour des parties rétrécies (7, 8) (« striplines ») d'une largeur de 500 nm, on utilise des lignes (1) et (2) d'une largeur généralement
30 comprise entre 5 et 10 μm .

La hauteur des lignes (1,2) et des parties rétrécies (7, 8) est généralement supérieure au diamètre des nanofils. Pour un nanofil d'un diamètre par exemple de 20 nm, on utilise typiquement des hauteurs entre 80 et 120 nm.

Comme on l'a représenté sur la Figure 2, la première et la seconde bandes conductrices (7, 8) peuvent être parallèles.

Généralement, la première et la seconde bandes électriquement conductrices (7, 8) présentent la même longueur comme on l'a représenté sur la Figure 2.

Cependant il n'est pas nécessaire que les bandes conductrices, "striplines" (7, 8) aient obligatoirement la même longueur.

La première et la seconde bande conductrice (7, 8) ont généralement chacune une longueur de 1 à 5 μm , par exemple de 3 μm .

L'espacement, écart entre les bandes électriquement conductrices (7, 8), a une influence sur le courant de fuite mesuré dans le circuit et sur la formation de l'alliage, par exemple du siliciure de métal.

Plus l'espacement est important, plus le courant de fuite mesuré est faible.

Un espacement d'environ 1 μm entre les bandes électriquement conductrices (7, 8) ne fournit pas généralement de courant de fuite appréciable dans le cas de nanofils non dopés tels que ceux utilisés dans les exemples.

Cependant, la situation peut être différente si les nanofils sont dopés.

De plus, le processus de formation de l'alliage, par exemple le processus de « siliciuration » par chauffage par effet Joule est autolimitant.

5 En effet, les longueurs des parties en alliage, par exemple en siliciure de métal ou de métalloïde, des nanofils peuvent être au plus d'environ 100 à 150 nm.

Cela signifie que si les deux bandes électriquement conductrices étaient disposées avec un
10 espacement entre elles de 1 μm , la longueur du canal du transistor qui pourrait être formé serait au plus de 700 nm.

Si le procédé doit être utilisé pour fabriquer des transistors avec des longueurs de canaux très
15 courtes, inférieures à 100 nm par exemple comme cela est requis par la feuille de route "ITRS", l'espacement entre les deux bandes électriquement conductrices doit être au plus de 300 nm.

La première et la seconde bandes conductrices
20 (7, 8) sont donc généralement espacées l'une de l'autre de 100 à 1000 nm, de préférence de 100 nm à 300 nm, par exemple de 200 nm.

Le dispositif selon l'invention comprend, en outre généralement, des moyens pour appliquer une
25 différence de potentiel déterminée, dite première différence de potentiel de chauffage $V_{\text{chauffage}}$, entre la première extrémité (3) de la première ligne électriquement conductrice (1) et la seconde extrémité (5) de la première ligne électriquement conductrice (1)
30 et faire ainsi passer un courant depuis la première

extrémité (3) vers la seconde extrémité (5) de la première ligne électriquement conductrice (1).

Ces moyens comprennent généralement un générateur de tension (9) dont l'une des bornes est reliée à la première extrémité (3) de la première ligne électriquement conductrice (1) par un premier câble (10) et l'autre borne est reliée à la seconde extrémité (5) de la première ligne (1) électriquement conductrice par un second câble (11) qui est généralement également relié à la terre (12).

Avantageusement, le générateur de tension (9) peut comporter des moyens (non représentés) permettant d'augmenter ou de diminuer la tension de chauffage de manière continue ou par incrément, de manière manuelle ou automatique, par exemple en fonction des valeurs mesurées de la première différence de potentiel de fuite.

Le dispositif selon l'invention comprend généralement, en outre, des moyens pour appliquer une différence de potentiel dite première différence de potentiel de polarisation entre la première zone de la surface du nanofil (17) (ou plutôt (19)) et la deuxième zone de la surface du nanofil (18) (ou plutôt (20)) dans le sens de la longueur du nanofil.

Ces moyens pour appliquer une différence de potentiel, dite première différence de potentiel de polarisation sont généralement également constitués par le même générateur de tension (9).

En d'autres termes, le générateur de tension (9) mentionné sur la Figure 2 et qui fournit la

première tension de chauffage dans la première ligne (1) doit généralement assurer deux fonctions :

1) Il doit fournir le courant de chauffage voulu, souhaité, généralement réglable, adaptable qui passe dans la bande électriquement conductrice (7) qui cause le chauffage par effet Joule de cette bande électriquement conductrice et qui entraîne la formation d'une phase d'alliage, par exemple d'une phase de siliciure.

2) Il doit fournir la tension de polarisation dans le nanofil entre les points (17) et (18) ((19) et (20)) qui est maintenue, fixe, constante pendant que l'on modifie le courant de chauffage qui passe dans la première bande électriquement conductrice (7).

Afin de permettre au générateur d'accomplir ces deux fonctions, on peut par exemple, comme cela a été le cas dans les expériences réalisées par les inventeurs, utiliser un amplificateur opérationnel.

Un tel dispositif est connu de l'homme du métier et ne sera pas décrit plus en détails.

Des dispositifs autres qu'un amplificateur opérationnel peuvent être utilisés.

L'important est que le générateur (9) puisse fournir le courant de chauffage qui cause le chauffage par effet Joule, ce courant pouvant être modifié de manière continue ou par incrément, et une tension de polarisation, constante, fixe sur la longueur du nanofil entre les points (17) et (18) ((19) et (20)).

La seconde extrémité (6) de la seconde ligne conductrice (2) est reliée à la terre (13) par l'intermédiaire d'un câble (14) sur lequel est placée

une résistance R en série avec le nanofil (15) lorsque celui-ci est disposé dans le dispositif selon l'invention.

Des moyens, tels qu'un Voltmètre, sont prévus pour mesurer la différence de potentiel, dite première différence de potentiel de fuite (V_{fuite} ou « V_{leak} » en langue anglaise) de part et d'autre de la Résistance R.

La valeur de cette différence de potentiel de fuite reflète le courant (16) qui passe dans le nanofil (15).

On dispose ainsi d'un moyen simple pour contrôler, suivre, la valeur du courant que l'on peut appeler courant de fuite qui circule dans le nanofil (15) et ainsi contrôler, suivre, la formation de l'alliage, par exemple du siliciure de métal.

Comme on l'a déjà vu plus haut, le dispositif selon l'invention peut éventuellement comprendre des moyens (non représentés) permettant de modifier le courant qui passe dans la première ligne électriquement conductrice (1) et dans la première bande électriquement conductrice (7), (en effet c'est le même courant qui passe dans la première ligne électriquement conductrice (1) et dans la première bande électriquement conductrice (7)) et finalement la quantité de chaleur dissipée par effet Joule au niveau du contact (19) entre le nanofil (15) et la partie de la première bande électriquement conductrice (7) en contact avec celui-ci.

Le dispositif selon l'invention peut également comprendre des moyens permettant de modifier, pour chaque valeur du courant de chauffage, la différence de

potentiel appliquée au nanofil entre la première portion ou zone (19) de la surface du nanofil et la seconde portion ou zone (20) de la surface du nanofil.

Il est à noter que dans le dispositif selon l'invention, les rôles de la première ligne électriquement conductrice (1) et de la seconde ligne électriquement conductrice (2) peuvent être inversés c'est-à-dire que le potentiel de chauffage peut être indifféremment appliqué à la première ligne (1) ou à la seconde ligne (2), l'autre ligne étant alors reliée à la terre via une résistance R ou R', dans ce dernier cas, le potentiel de chauffage est appliqué à la seconde ligne (2).

Le dispositif selon l'invention peut comprendre ainsi en outre éventuellement, des moyens pour appliquer une différence de potentiel déterminée, également dite différence de potentiel de chauffage $V_{\text{chauffage}}$, entre la première extrémité (4) de la seconde ligne électriquement conductrice (2) et la seconde extrémité (6) de la seconde ligne électriquement conductrice (2) et faire ainsi passer un courant depuis la première extrémité (4) vers la seconde extrémité (6) de la seconde ligne électriquement conductrice (2).

Ces moyens comprennent généralement un générateur de tension (appelé (9') par commodité, mais non représenté) dont l'une des bornes est reliée à la première extrémité (4) de la seconde ligne électriquement conductrice (2) par un premier câble et l'autre borne est reliée à la seconde extrémité (6) de la seconde ligne électriquement conductrice (2) par un

second câble qui est généralement également relié à la terre.

Avantageusement, le générateur de tension (9') peut comporter des moyens permettant d'augmenter ou de
5 diminuer la tension de chauffage de manière continue ou par incrément, de manière manuelle ou automatique, par exemple en fonction des valeurs mesurées de la différence de potentiel de fuite.

Le dispositif selon l'invention peut comprendre
10 éventuellement, en outre, des moyens pour appliquer une différence de potentiel dite deuxième différence de potentiel de polarisation entre la deuxième zone de la surface du nanofil (18) (ou plutôt (20)) et la première zone de la surface du nanofil (17), ou plutôt (19) dans
15 le sens de la longueur du nanofil.

Ces moyens pour appliquer une différence de potentiel, dite deuxième différence de potentiel de polarisation sont généralement également constitués par le même générateur de tension (9').

Il est à noter qu'un seul générateur peut être
20 utilisé pour remplir à la fois le rôle des générateurs (9) et (9'), ce générateur unique pouvant être relié soit aux extrémités (3, 5) de la première ligne électriquement conductrice (1), soit aux extrémités (4,
25 6) de la seconde ligne électriquement conductrice (2) par des câbles adéquats.

Lorsque la tension de chauffage est appliquée à la seconde ligne électriquement conductrice (2), la seconde extrémité (5) de la première ligne
30 électriquement conductrice (1) est reliée à la terre par l'intermédiaire d'un câble sur lequel est placée

une résistance R' en série avec le nanofil (15), lorsque celui-ci est disposé dans le dispositif selon l'invention.

Des moyens, tels qu'un Voltmètre, sont prévus pour mesurer la différence de potentiel, dite deuxième différence de potentiel de fuite (V_{fuite} ou « V_{leak} » en langue anglaise) de part et d'autre de la Résistance R' .

Il est à noter qu'une seule résistance peut être utilisée pour remplir à la fois le rôle des résistances R et R' , cette résistance unique pouvant être reliée soit à la deuxième extrémité (5) de la première ligne électriquement conductrice (1) et à la terre, soit à la deuxième extrémité (6) de la deuxième ligne électriquement conductrice (2) et à la terre, par des câbles adéquats.

On va maintenant décrire le procédé selon l'invention qui met généralement en œuvre le dispositif tel que décrit en détail plus haut et sur la Figure 2.

Dans ce procédé, on commence par déposer des nanofils en un semi-conducteur sur un substrat, par exemple un substrat en forme de couche, ce substrat étant en un matériau électriquement isolant.

Les nanofils peuvent être en tout semi-conducteur qui peut former un alliage avec un métal ou métalloïde. Ce métal ou métalloïde est bien entendu différent du semi-conducteur des nanofils.

De préférence, les nanofils sont des nanofils de silicium, éventuellement dopés.

Les nanofils tels que des nanofils de silicium peuvent être préparés par tout procédé adéquat.

Par exemple, les nanofils de silicium peuvent être préparés par croissance sur un substrat à l'aide d'un procédé de dépôt chimique en phase vapeur (« Chemical Vapour Deposition » ou « CVD » en langue anglaise) puis séparés de ce substrat.

Ou bien les nanofils de silicium peuvent être préparés par le procédé d'attaque standard utilisé dans l'industrie pour la fabrication des circuits intégrés.

Le procédé selon l'invention peut être mis en œuvre avec succès avec toutes sortes de nanofils quels que soient leurs diamètres ou longueurs.

Avantageusement, les nanofils, peuvent avoir une longueur de 0,5 à 10 μm et un diamètre de 20 à 50 nm.

Les nanofils qui ont été utilisés pour mettre en œuvre l'invention notamment dans les exemples joints, ont généralement une longueur de l'ordre de 10 μm et un diamètre de 20 à 50 nm.

Cependant, l'invention peut aussi être mise en œuvre avec des nanofils de plus petit ou de plus grand diamètre à la condition que leur longueur soit d'au moins 0,5 μm .

Tout type de matériau électriquement isolant qui est thermiquement stable peut être utilisé pour constituer le substrat électriquement isolant, par exemple la couche électriquement isolante sur laquelle sont déposés les nanofils.

Le substrat électriquement isolant peut éventuellement jouer aussi le rôle de puits thermique (« thermal sink » en anglais). En conséquence, le matériau du substrat électriquement isolant peut

éventuellement mais pas nécessairement être aussi thermiquement conducteur.

On peut penser que les propriétés thermiques du substrat isolant peuvent avoir une influence sur le procédé, par exemple sur la pénétration maximale des alliages tels que les siliciures formés.

En d'autres termes, en utilisant un substrat électriquement isolant avec une conductivité thermique plus faible, il peut être éventuellement possible d'obtenir une profondeur de pénétration plus importante des alliages, tels que les siliciures, formés.

Ce qui est important est que le substrat électriquement isolant puisse supporter des températures supérieures à celles requises pour que se forme l'alliage métal (métalloïde) semi-conducteur, c'est-à-dire plusieurs centaines de degrés Celsius.

Ainsi, dans le cas de nanofils en silicium préparés par croissance sur un substrat à l'aide d'un procédé de dépôt en phase vapeur, on pourra les déposer sur un substrat, par exemple un substrat sous la forme d'une couche, en silice, en nitrure de silicium ou en alumine.

Il ne s'agit là que d'exemples de substrats, par exemple sous la forme de couches, où l'on peut déposer les nanofils.

D'autres substrats peuvent être utilisés, le point important étant que les nanofils soient déposés sur un substrat isolant qui est également thermiquement stable.

Le substrat, notamment lorsqu'il est sous la forme d'une couche, en matériau électriquement isolant

peut être disposé au sommet d'un autre substrat en un autre matériau.

Par exemple, les nanofils, par exemple en silicium, peuvent être déposés sur une couche de SiO₂, par exemple d'une épaisseur de 300 nm, au sommet d'un substrat en silicium fortement dopé.

Toutefois, la présence d'un substrat fortement dopé n'affecte pas le procédé, car le point important est que les nanofils doivent être déposés sur un substrat, par exemple une couche, électriquement isolante.

Pour déposer les nanofils, par exemple en silicium, sur le substrat, par exemple la couche, en un matériau électriquement isolant, on peut par exemple les disperser dans un solvant adéquat, tel qu'un alcool comme l'isopropanol et déposer cette solution sur la couche en un matériau électriquement isolant. Une fois le solvant évaporé, on obtient une couche sur laquelle les nanofils sont déposés.

Les positions des nanofils déposés sur la couche sont généralement aléatoires. Les nanofils peuvent cependant être repérés, localisés sur la couche à l'aide de marques préalablement définies, réalisées sur la couche.

Le fait que les nanofils occupent des positions, emplacements aléatoires sur le substrat n'a pas d'impact sur le procédé car une fois que les nanofils sont déposés sur la surface, ils peuvent être facilement localisés, éventuellement à l'aide des marques mentionnées plus haut.

Toutefois, le procédé selon l'invention peut être facilement adapté dans le cas où l'on souhaite que les nanofils soient disposés selon des structures, motifs ordonnés, par exemple sous la forme de rangées
5 ordonnées de nanofils disposés dans un plan.

Dans ce cas, il est nécessaire de mieux contrôler les positions spécifiques des nanofils.

Cela est possible avec différentes techniques telles que les techniques de di-électrophorèse ou les
10 techniques microfluidiques qui permettent de positionner les nanofils à des emplacements spécifiques, par exemple qui permettent de disposer les nanofils parallèlement.

En disposant les nanofils selon des structures, motifs ordonnés, par exemple sous la forme de rangées
15 ordonnées de nanofils disposés dans un plan, le procédé selon l'invention peut avoir une capacité de production élevée.

Les nanofils adhèrent au substrat, tel qu'une
20 couche, sous l'action de forces de Van der Waals. Une fois qu'ils sont déposés, les nanofils ne se déplacent plus et restent à l'endroit où ils ont été initialement déposés.

L'étape suivante du procédé selon l'invention ou étape de mise en contact (étape b)) peut comprendre
25 une opération au cours de laquelle on recouvre les nanofils en un semi-conducteur d'une couche de métal ou de métalloïde en vue de former les bandes électriquement conductrices (7, 8).

30 Avant de déposer le métal sur le nanofil, on élimine généralement la couche d'oxyde natif, par

exemple de SiO₂ dans le cas de nanofils en silicium, à la surface des nanofils par exemple par trempage dans une solution de HF tamponnée (« Buffered HF » ou BHF en langue anglaise).

5 Le dépôt du métal peut être réalisé sur la première portion ou zone (19) de la surface du nanofil en silicium qui va se trouver en contact avec la partie centrale (17) de la partie rétrécie (7) entre la première extrémité (3) et la seconde extrémité (5) de
10 la première ligne conductrice (1) et sur la deuxième portion ou zone (20) de la surface du nanofil qui va se trouver en contact avec la partie centrale (18) de la partie rétrécie (8) entre la première extrémité (4) et la seconde extrémité (6) de la seconde ligne
15 conductrice (2).

Le métal qui recouvre les nanofils est choisi de préférence parmi le nickel, le platine et tous les matériaux aptes à former des alliages métalliques avec les semi-conducteurs composant le nanofil.

20 Il a été mis en évidence que le procédé fonctionnait particulièrement bien avec le nickel, mais aussi avec le platine qui est avec le nickel, l'autre matériau couramment utilisé dans l'industrie micro-électronique pour fabriquer les contacts de
25 transistors.

La quantité de métal déposée sur le nanofil dépend du diamètre du nanofil. Des nanofils de plus grand diamètre nécessitent de plus grandes quantités de métal.

30 L'épaisseur de la couche du métal ou métalloïde utilisé pour cette invention est généralement de 80 à

120 nm. Cette épaisseur peut être modifiée en fonction fonction du diamètre des nanofils semi-conducteurs.

Généralement, l'épaisseur doit être d'au moins deux fois le diamètre du nanofil.

5 Ainsi, une épaisseur typique est d'environ 120 nm pour des nanofils d'un diamètre de 20 nm à 50 nm.

Le dépôt du métal ou métalloïde sur les nanofils peut être réalisé par tout procédé de dépôt de
10 métal. Ce dépôt est généralement réalisé par un procédé d'évaporation de métal par faisceau d'électrons (« E-Beam Metal Evaporation » en langue anglaise) dans lequel une cible métallique est bombardée par un faisceau d'électrons, ce qui provoque l'évaporation du
15 métal de la cible.

Un autre procédé de dépôt est la pulvérisation cathodique. Le dépôt par pulvérisation cathodique est avantageusement utilisé pour le dépôt de contacts en platine.

20 Lors de l'étape b) du procédé, on met en contact la première zone de la surface du nanofil (15) par exemple en silicium, avec la partie centrale (17) de la bande électriquement conductrice (7) entre la première extrémité (3) et la seconde extrémité (5) de
25 la première ligne électriquement conductrice (1) et on met en contact une seconde zone de la surface du nanofil espacée de la première zone dans le sens de la longueur du nanofil, avec la partie centrale (18) de la bande électriquement conductrice (8) entre la première
30 extrémité (4) et la seconde extrémité (6) de la seconde ligne électriquement conductrice (2).

On a vu plus haut que la première (7) et la seconde (8) bandes conductrices sont généralement espacées l'une de l'autre de 100 nm à 300 nm, par exemple de 200 nm, de ce fait la première et la seconde zones du nanofil sont généralement espacées l'une de l'autre de 100 nm à 300 nm, par exemple de 200 nm.

Généralement, la première et la seconde zones du nanofil sont mises en contact généralement au centre ou quasiment au centre de chacune des deux parties centrales (17, 18), c'est-à-dire au centre ou quasiment au centre de chacune des deux bandes électriquement conductrices (7, 8) et de chacune des deux lignes (1, 2).

La mise en contact peut en outre comprendre une opération au cours de laquelle on définit effectivement des bandes électriquement conductrices sur les nanofils, par exemple par lithographie.

Par « presque au centre ou quasiment au centre », on entend que le nanofil est positionné avec une précision d'environ 200 nm ou moins et de préférence d'environ 50 nm ou moins, pour des bandes conductrices parallèles (7, 8) par exemple d'une longueur de 3 μm et séparées de 200 nm.

Il est à noter que la précision de 200 nm est la précision qui a été obtenue avec le système de lithographie mis en œuvre dans les exemples, mais des systèmes de lithographie perfectionnés peuvent permettre d'obtenir une précision dans le positionnement du nanofil qui est beaucoup plus élevée, par exemple de l'ordre de 50 nm ou moins.

Cependant, avec une précision de 200 nm, il a été constaté que le procédé fonctionnait très bien.

Le nanofil est généralement placé en-dessous des deux bandes conductrices (7, 8) comme cela est représenté sur la Figure 2 et en contact avec chacune
5 de ces bandes.

Les Figures 8A et 8B montrent une vue de dessus d'un substrat sur lequel sont disposés plusieurs nanofils (81) et plusieurs dispositifs selon
10 l'invention avec des lignes conductrices (82) comprenant des parties rétrécies ou bandes (83).

Une fois le nanofil ainsi disposé, on applique une différence de potentiel, dite première différence de potentiel de chauffage $V_{\text{chauffage}}$, entre la première
15 extrémité (3) de la première ligne électriquement conductrice (1) et la seconde extrémité (5) de la première ligne électriquement conductrice en un métal ou métalloïde (1), cette différence de potentiel étant suffisante pour provoquer un échauffement de la partie
20 centrale (17) de la partie rétrécie (7) de la première ligne électriquement conductrice (1) et de la première zone de la surface du nanofil tel que le métal ou le métalloïde diffuse dans le nanofil (15) pour former un alliage avec le semi-conducteur, tel qu'un siliciure de
25 métal.

Comme on l'a déjà indiqué plus haut, le générateur de courant (9) est capable de fournir le courant de chauffage qui provoque le chauffage par effet Joule de la bande (7), et ce même générateur,
30 pour chaque valeur du courant de chauffage qui traverse la bande (7) peut fournir une tension de polarisation

fixe, constante dans le nanofil entre les points (17) et (18).

On peut ainsi augmenter progressivement ou par incrément la différence de potentiel appliquée à la première ligne conductrice (1) généralement depuis un
5 potentiel nul, pour atteindre une valeur du courant telle qu'elle provoque un échauffement par effet Joule de la bande électriquement conductrice (7).

Un courant d'environ 15 à 20 mA, par exemple,
10 est généralement suffisant pour provoquer la diffusion du métal ou du métalloïde de la bande conductrice dans le nanofil et donc la formation d'un alliage tel qu'un siliciure.

Plus précisément, chaque valeur du courant
15 provoque un accroissement instantané de la température de la bande électriquement conductrice (« stripline »), mais les inventeurs ont pu montrer qu'une valeur du courant généralement entre 15 and 20 mA donnait lieu à la formation d'un alliage, tel qu'un siliciure.

Ce courant, généralement d'environ 15 à 20 mA
20 est donc le courant assurant un échauffement, ou plus exactement une élévation de la température de la partie centrale (17) de la partie rétrécie (7) de la première ligne électriquement conductrice (1) telle qu'elle
25 assure la diffusion du métal à l'intérieur du nanofil (15).

Les incréments avec lesquels on augmente la différence de potentiel de chauffage $V_{\text{chauffage}}$ peuvent être par exemple des incréments de 0,1 Volt.

Pour chaque valeur de $V_{\text{chauffage}}$, la différence de
30 potentiel entre les deux extrémités du nanofil est

maintenue à une valeur fixe, par exemple de 1 Volt. Cette différence de potentiel donne lieu à un courant de fuite à travers le nanofil dont la valeur est directement reliée à la longueur du canal semi-conducteur, qui dépend de la longueur de pénétration du métal dans le nanofil. Ce courant de fuite est utilisé comme paramètre de rétroaction pour contrôler l'alliage des contacts et arrêter le procédé à la longueur du canal désirée.

10 Il est bien évident que la valeur de la différence de potentiel $V_{\text{chauffage}}$ qui permet d'obtenir un échauffement de la partie centrale (17) de la partie rétrécie de la première ligne électriquement conductrice (1) et une diffusion du métal varie en
15 fonction de la résistance de la première ligne électriquement conductrice (1) et de la première bande électriquement conductrice (7).

De manière générale pour des lignes et bandes conductrices classiques, cette différence de potentiel
20 pourra être par exemple de 1 à 2 Volts.

Si l'on considère la résistance normalisée de la ligne conductrice et de la bande conductrice, qui est le rapport entre la résistance $R(I)$ ($R'(I)$) de la ligne et de la bande dans laquelle passe un courant
25 d'intensité I et la résistance de la même ligne et de la même bande à une très faible polarisation, ce rapport sera supérieur à un dès qu'il y a une dissipation de chaleur, due par exemple à une température plus élevée du métal de la partie centrale
30 de la partie rétrécie de la ligne conductrice, près du milieu de la bande.

On peut considérer qu'il y a un échauffement à partir d'une résistance normalisée de 1 mais qu'il faut augmenter $V_{\text{chauffage}}$ et donc la résistance normalisée au-dessus de 1,2 voire 1,3 pour que le courant de fuite
5 augmente et donc l'alliage, tel qu'un siliciure se forme.

En d'autres termes, il a été mis en évidence, comme on l'a déjà mentionné plus haut, que la formation d'un alliage, tel qu'un siliciure, est accomplie en
10 faisant passer un courant entre 15 et 20 mA dans la ligne électriquement conductrice et dans la bande électriquement conductrice (c'est le même courant qui passe dans la ligne et dans la bande).

Si l'on s'intéresse à la résistance normalisée, on a trouvé expérimentalement que ces valeurs du courant de chauffage correspondent à des valeurs de la
15 résistance normalisée comprises entre 1,2 et 1,3.

Comme le prouve la Figure 6, lorsque la résistance normalisée atteint une valeur comprise entre
20 1,2 et 1,3, on commence à mesurer un courant non négligeable qui traverse le nanofil et qui indique la formation d'une phase d'alliage, par exemple d'une phase de siliciure.

Sans vouloir être lié par aucune théorie, et
25 comme on l'a déjà indiqué plus haut, la partie rétrécie (7, 8) des lignes conductrices (1, 2) constitue une gêne locale pour le passage du courant dans la bande conductrice. En d'autres termes, cette partie rétrécie constitue, un resserrement, un rétrécissement, une
30 « constriction » pour le passage du courant. En conséquence, une température très élevée est atteinte

dans la partie centrale de la bande électriquement conductrice où se trouve positionné le nanofil.

Cette température très élevée peut être par exemple de 400 à 1000°C. Elle doit être suffisante pour activer le processus de diffusion du métal dans le nanofil et en même temps, elle ne doit pas excéder la température de fusion du métal afin de ne pas provoquer sa rupture.

Le point le plus chaud correspond généralement au milieu de la partie rétrécie de la ligne conductrice.

Le chauffage local du contact du fait de la dissipation de chaleur par effet Joule provoque un « recuit » du contact.

En d'autres termes, le métal constituant la bande conductrice, et qui généralement recouvre le nanofil, commence à diffuser à l'intérieur du nanofil, dans le sens de l'épaisseur du nanofil mais aussi généralement dans le sens de la longueur de celui-ci, pour former un alliage entre le métal ou métalloïde constituant la bande conductrice, qui recouvre généralement le nanofil et le semi-conducteur du nanofil tel que le silicium. Cet alliage est, par exemple, un siliciure de métal.

Selon l'invention, la longueur de la partie du nanofil de silicium où est formé l'alliage du métal ou métalloïde et du semi-conducteur, tel qu'un siliciure de métal est auto-limitante.

Cela est dû à la présence de la couche de matériau électriquement isolant tel que du SiO₂ sur laquelle sont déposés les nanofils et qui joue le rôle

de drain, ou puits thermique. Ainsi, la longueur de la partie siliciée autour du contact entre la première bande conductrice et le nanofil est auto-limitée, par exemple à environ 150 nm.

5 Selon l'invention, on mesure en outre une différence de potentiel, dite différence de potentiel de fuite, de part et d'autre d'une résistance R en série avec le nanofil située entre la seconde extrémité (6) de la seconde ligne (2) électriquement conductrice
10 et la terre.

Grace à cette mesure du potentiel de fuite, on peut ainsi suivre, contrôler, simultanément le courant appelé courant de fuite (16) qui passe dans le nanofil de silicium (15) puis dans la seconde bande
15 électriquement conductrice (8) et enfin dans la résistance R.

Il a été constaté que la valeur du courant de fuite correspondant à une tension de polarisation entre les points (17) et (18), ou plutôt entre les points
20 (19) et (20) du nanofil, de 1 Volt, restait constante et voisine de zéro jusqu'à une valeur de la résistance normalisée de la première ligne conductrice généralement égale à 1 puis augmentait brutalement à partir d'une valeur déterminée de la résistance
25 normalisée pour atteindre par exemple environ 7 nA.

Plus précisément, on commence par polariser la nanofil, par exemple avec une tension de 1 Volt, par exemple entre les points (17) et (18), ou plutôt (19) et (20).

30 Puis, on augmente le courant de chauffage qui passe dans la dans la première ligne électriquement

conductrice (1) et dans la première bande électriquement conductrice (7) (c'est le même courant qui passe dans la ligne et dans la bande) jusqu'à une valeur comprise généralement entre 15 et 20 mA tout en maintenant fixe à 1 Volt le potentiel de polarisation, entre les points (17) et (18) ou plutôt (19) et (20).

A un certain moment, on commence à mesurer un courant de l'ordre de quelques nanoampères qui passe dans la résistance R, et c'est alors que l'alliage, tel qu'un siliciure se forme.

On dispose ainsi d'un moyen de contrôler, réguler, la pénétration, l'infiltration, du métal ou métalloïde dans le nanofil en épaisseur et généralement en profondeur.

Plus précisément, on pourrait plutôt dire que l'on contrôle, maîtrise, régule, la pénétration de l'alliage, tel qu'un siliciure tout au long de la longueur du nanofil.

On peut déclencher, stopper ou accélérer la diffusion du métal ou métalloïde et la formation de l'alliage, par exemple du siliciure de métal en modifiant la valeur de la différence de potentiel appliquée à la première ligne électriquement conductrice (1) et, par conséquent, la valeur de l'intensité du courant de chauffage qui passe dans cette première ligne électriquement conductrice et dans la première bande électriquement conductrice (c'est le même courant qui passe dans la ligne et dans la bande).

Le procédé selon l'invention, contrairement aux procédés qui mettent en œuvre un recuit dans un four permet un contrôle électrique du processus d'alliage

métal/semi-conducteur. Ce contrôle s'effectue *in-situ* grâce à une surveillance, un monitoring (« monitoring » en anglais) du courant de fuite et à une rétroaction sur le courant de chauffage.

5 Ce procédé est fiable et reproductible car les bandes électriquement conductrices définies par exemple par lithographie sur les nanofils ont toujours la même géométrie et la même résistance, comme cela a pu être mis en évidence par des mesures de résistance à quatre
10 sondes. La résistance globale et la géométrie de la ligne, connexion métallique (1) ou (2), dans laquelle se trouve incluse la bande électriquement conductrice (7) ou (8) peuvent varier mais le processus conduisant à la formation de l'alliage, par exemple à la formation
15 du siliciure de métal est régi par la bande électriquement conductrice (7) ou (8) et par elle-seule.

En effet, ce processus est régi par la puissance dissipée dans les bandes conductrices (7) et
20 (8) par effet Joule qui à son tour dépend uniquement de la résistance de la bande conductrice.

Dans le cas où l'on souhaite préparer un transistor, après avoir préparé un alliage tel qu'un siliciure de métal au niveau de la première zone du
25 nanofil (19), on inverse les rôles joués par la première et la seconde lignes électriquement conductrices (1, 2) et on applique une différence de potentiel, dite deuxième différence de potentiel de chauffage entre la première extrémité (4) de la seconde
30 ligne électriquement conductrice (2), et la seconde extrémité (6) de la seconde ligne électriquement

conductrice (2), cette différence de potentiel étant suffisante pour provoquer un échauffement de la partie centrale (18) de la bande électriquement conductrice (8) de la seconde ligne électriquement conductrice (2),
5 et de la deuxième zone de la surface du nanofil (20) tel que le métal ou métalloïde diffuse dans le nanofil (15) pour former un alliage de métal ou métalloïde tel qu'un siliciure de métal.

En même temps, la différence de potentiel entre
10 les points de contact (19) et (20) est maintenue fixe, par exemple à 1 Volt, afin de produire un courant de fuite à travers le nanofil tout en permettant une rétroaction sur le processus d'alliage au niveau du deuxième contact (20).

15 La longueur du canal du transistor, déterminée par la longueur de pénétration de l'alliage métal/semi-conducteur au niveau du deuxième contact (20), est directement reliée au courant de fuite. Dès que la longueur du canal se réduit, le courant de fuite
20 augmente.

Comme on peut le voir sur la Figure 3, un tel transistor formé dans un nanofil (31), en un semi-conducteur comprend deux parties (32, 33) en alliage du semi-conducteur et du métal ou métalloïde, par exemple
25 en siliciure de métal, tel que le siliciure de nickel. Ces parties (32, 33) sont formées dans le nanofil depuis les contacts (34, 35) entre les première et seconde bandes électriquement conductrices (36, 37) et le nanofil (31) et une partie centrale (38) en semi-
30 conducteur, par exemple en silicium. Cette partie centrale du nanofil constitue le canal du transistor.

Comme on l'a précisé plus haut, dans le procédé selon l'invention, on réalise un contrôle électrique de la longueur (39) du canal du transistor en observant le courant de fuite (premier et deuxième courants de fuite).

La courbe de la Figure 4 montre que l'on peut effectivement régler la longueur du canal d'un transistor à nanofil en ajustant la valeur du courant de fuite

La microphotographie de la Figure 5 ainsi que la Figure 7, démontrent que le procédé selon l'invention permet de fabriquer des transistors à nanofils de silicium avec des longueurs de canal d'environ 20 nm.

L'invention va maintenant être décrite en référence à l'exemple suivant donné à titre illustratif et non limitatif.

Exemple :

On fait croître des nanofils de silicium sur un substrat par un procédé de dépôt chimique en phase vapeur (« CVD »).

Les nanofils sont ensuite séparés du substrat de croissance au moyen d'une légère agitation avec des ultrasons qui provoque leur libération dans une solution d'isopropanol.

Puis, les nanofils sont dispersés à l'aide d'une pipette sur un substrat en silicium fortement dopé recouvert par une couche d'oxyde thermique de haute qualité d'une épaisseur d'environ 300 nm.

Le substrat en silicium fortement dopé est utilisé comme une électrode de grille.

La position des nanofils sur le substrat est repérée à l'aide de marques d'alignement pré-existantes. Les contacts métalliques sur chacun des nanofils sont définis par une étape de lithographie par faisceau d'électrons, une étape de dépôt de métal par faisceau d'électrons (120 nm de nickel), et une étape de « lift-off » par immersion dans l'acétone pendant 10 minutes à environ 55°C.

Avant le dépôt du métal, l'oxyde natif sur la surface des nanofils est éliminé par trempage pendant 5 secondes dans de l'acide fluorhydrique tamponnée (« BHF ») 5/1 contenant 5,40 % de NH_4F et 1,49% de HF.

Le dispositif pour former un siliciure de métal sur les nanofils mis en œuvre dans cet exemple est le dispositif décrit sur la Figure 2.

Plus précisément des nanofils en silicium ont été synthétisés à partir de nanoparticules d'or dans un réacteur de dépôt chimique en phase vapeur CVD (« Chemical Vapour Deposition » ou « CVD » en langue anglaise).

Les nanofils sont des nanofils non dopés avec des diamètres de 20 à 40 nm.

La fabrication des dispositifs selon l'invention, en vue de mettre en œuvre le procédé selon l'invention, est faite de la façon suivante :

1. on dépose les nanofils de silicium sur un substrat de silicium fortement dopé, avec une couche superficielle d'oxyde thermique d'environ 300 nm d'épaisseur ;

2. on dépose une couche de PMMA (Poly (Méthacrylate de Méthyle)) et on repère la position des nanofils par rapport à un réseau prédéfini de plots métalliques, dits repères « markers » d'alignement ;

5 3. on expose la surface à un faisceau d'électrons afin de définir des lignes qui seront successivement métallisées ;

4. l'échantillon est mis dans une solution de Methyl Isobutyl Cétone (« MIK ») et d'isopropanol qui
10 enlève uniquement le PMMA exposé au faisceau électronique ;

5. l'échantillon est immergé pendant environ 6 secondes dans une solution « BHF » à base d'acide fluorhydrique afin d'éliminer la couche d'oxyde de silicium qui recouvre la surface exposée des nanofils ;
15

6. juste après cette attaque chimique, l'échantillon est transféré dans un bâti de pulvérisation électronique et une couche d'environ 80 à 120 nm de métal, par exemple de nickel, est déposée ;

20 7. la fabrication de l'échantillon est complétée avec un processus dit de « lift-off » effectué dans un bain d'acétone qui enlève le PMMA et la couche de métal au-dessus. Par conséquent, le métal reste uniquement en correspondance des lignes définies
25 par le faisceau électronique et qui deviennent, pour chaque nanofil contacté, les lignes métalliques (1) et (2) et les bandes métalliques (7) et (8), disposées parallèlement l'une à l'autre, ces deux bandes étant chacune perpendiculaires au nanofil.

Chacune des bandes (7, 8) a généralement une longueur de 3 μm et les deux bandes sont généralement séparées de 200 nm.

Le nanofil se trouve donc disposé sous chacune des bandes et est au contact de celles-ci sensiblement au milieu de chacune d'elles, avec une précision par exemple d'environ 200 nm.

Avec un générateur de tension, on fait croître la différence de potentiel $V_{\text{chauffage}}$ dans la première ligne (1), en gardant une différence de potentiel fixe, par exemple de 1 Volt, entre les points (17) et (18), ou plutôt (19) et (20), afin de produire un courant de fuite pour le monitoring du processus.

Le courant de chauffage, induit par la différence de potentiel $V_{\text{chauffage}}$, peut atteindre une valeur d'environ 15 à 20 mA. La différence de potentiel appliquée entre les points (3) et (5) est d'environ 1 Volt.

La bande (7) agit comme une constriction au passage du courant, de sorte qu'une température très élevée est atteinte dans la portion centrale (17) de la bande métallique (7), là où le nanofil est en contact avec la bande (7).

Le chauffage local du contact par effet Joule provoque un recuit du contact. En d'autres termes, le métal, tel que le nickel, qui recouvre le nanofil, commence à diffuser vers l'intérieur du nanofil pour former un alliage métallique, par exemple de nickel et de silicium, c'est-à-dire un siliciure métallique.

Grâce à l'appareil mis en œuvre selon l'invention, il est possible de contrôler en même temps

le courant qui passe dans le nanofil en mesurant la différence de potentiel V_{fuite} dans la résistance R qui est disposée en série avec le nanofil à l'extrémité de la seconde ligne (2).

5 Afin de pouvoir suivre en temps réel les modifications qui sont induites dans la morphologie du nanofil, les expériences ont été réalisées avec un MEB équipé pour effectuer des mesures électriques tout en observant le nanofil.

10 Sur la Figure 6, on a porté les valeurs mesurées du courant de fuite (courbe B) qui passe dans le nanofil en fonction de temps ainsi que la valeur de la résistance normalisée (courbe A) de la première ligne(1).

15 La résistance normalisée de la première ligne(1) (est le rapport entre la résistance $R(I)$ de la bande dans laquelle passe un courant d'intensité I , et la résistance de la bande à une très faible polarisation.

20 Ce rapport est supérieur à 1 dès qu'il y a une dissipation de chaleur, due par exemple à une température plus élevée du métal près du milieu de la bande.

25 Lorsque l'on augmente le potentiel par incréments de 0,1 V, on mesure des incréments de la résistance normalisée qui montrent que pour chaque valeur de la différence de potentiel que l'on applique, on induit un chauffage instantané du métal. Le courant de fuite dans le nanofil reste constant jusqu'à ce que
30 la résistance normalisée de la ligne atteigne une valeur proche de 1,3, ce qui correspond à une valeur du

courant qui passe dans le nanofil d'environ 7 nA (voir Figure 6).

La Figure 7 est une microphotographie prise au MEB du dispositif avec lequel un traitement de chauffage par effet Joule a été réalisé des deux côtés du nanofil (71) ; c'est-à-dire que la tension de chauffage a tout d'abord été appliquée à la première bande (72), aucune tension de chauffage n'étant appliquée à la seconde bande (73) puis la tension de chauffage a été appliquée à la seconde bande (73), aucune tension de chauffage n'étant appliquée à la première bande (72).

Comme le montre de manière évidente la photographie, des régions plus claires, indiquées par les flèches (74), juste en-dessous de chaque contact, apparaissent après le traitement. Ces régions plus claires correspondent à des régions siliciées de siliciure de nickel.

La photographie démontre donc qu'un chauffage local par effet Joule peut effectivement former un siliciure sur un nanofil de silicium.

De plus, en mesurant en même temps le courant de fuite qui passe dans le nanofil, il y a ainsi un moyen de contrôler la pénétration du métal le long du nanofil et éventuellement en principe, également la profondeur de la pénétration, du métal.

REVENDICATIONS

1. Dispositif pour former sur un nanofil en un semi-conducteur (15), un alliage de ce semi-conducteur
5 avec un métal ou un métalloïde, ledit dispositif comprenant :

- une première bande électriquement conductrice (7) en un métal ou un métalloïde apte à former un alliage avec le semi-conducteur du nanofil
10 (15), et une seconde bande électriquement conductrice (8) en un métal ou un métalloïde apte à former un alliage avec le semi-conducteur du nanofil, espacées l'une de l'autre, la première (7) et la seconde (8) bandes électriquement conductrices formant une partie
15 rétrécie respectivement d'une première ligne électriquement conductrice (1) et d'une seconde ligne électriquement conductrice (2), lesdites première (1) et seconde (2) lignes électriquement conductrices comprenant chacune une première extrémité (3, 4) et une
20 seconde extrémité (5, 6), la partie centrale (17) de la première bande électriquement conductrice (7) étant apte à être mise en contact avec une première zone (19) de la surface du nanofil et la partie centrale (18) de la seconde bande électriquement conductrice (8) étant
25 apte à être mise en contact avec une deuxième zone (20) de la surface du nanofil, espacée de la première zone (19) dans le sens de la longueur du nanofil ;

- des moyens (9, 10, 11) pour appliquer une différence de potentiel, entre la première extrémité
30 (3) de la première ligne électriquement conductrice (1) et la seconde extrémité (5) de la première ligne

électriquement conductrice (1) et faire passer un courant depuis la première extrémité (3) vers la seconde extrémité (5) de la première ligne électriquement conductrice (1), et des moyens (14) pour
5 relier la seconde extrémité (6) de la seconde ligne électriquement conductrice (2) à la terre (13), lesdits moyens comprenant une résistance R ;

- éventuellement, des moyens pour appliquer une différence de potentiel, entre la première
10 extrémité (4) de la seconde ligne électriquement conductrice (2) et la seconde extrémité (6) de la seconde ligne électriquement conductrice (2) lorsqu'aucune différence de potentiel n'est appliquée entre la première extrémité (3) de la première ligne
15 électriquement conductrice (1) et la seconde extrémité (5) de la première ligne électriquement conductrice (1) et faire passer un courant depuis la première extrémité (4) vers la seconde extrémité (6) de la seconde ligne électriquement conductrice (2), et éventuellement des
20 moyens pour relier la seconde extrémité (5) de la première ligne électriquement conductrice (1) à la terre, lesdits moyens comprenant une résistance R' ;

- des moyens pour mesurer une différence de potentiel, dite première différence de potentiel de
25 fuite de part et d'autre de la résistance R ;

- éventuellement, des moyens pour mesurer une différence de potentiel, dite deuxième différence de potentiel de fuite de part et d'autre de la résistance
R' ;

30 - des moyens pour appliquer une différence de potentiel, dite première différence de potentiel de

polarisation entre la première zone (19) de la surface du nanofil et la deuxième zone (20) de la surface du nanofil, dans le sens de la longueur du nanofil ;

- éventuellement, des moyens pour appliquer
5 une différence de potentiel, dite deuxième différence de potentiel de polarisation entre la deuxième zone (20) de la surface du nanofil et la première zone (19) de la surface du nanofil (15), dans le sens de la longueur du nanofil lorsque la première différence de
10 potentiel de polarisation n'est pas appliquée.

2. Dispositif selon la revendication 1, dans lequel la première (7) et la seconde (8) bandes électriquement conductrices sont parallèles.

15

3. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la première (7) et la seconde (8) bandes électriquement conductrices ont chacune une longueur de 1 à 5 μm , par exemple de
20 3 μm .

4. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la première (7) et la seconde (8) bandes électriquement conductrices
25 sont espacées l'une de l'autre de 100 nm à 300 nm, par exemple de 200 nm à 300 nm.

5. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la première (7)
30 et la seconde (8) bandes électriquement conductrices sont en nickel ou en platine.

6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les moyens (9, 10, 11) pour appliquer une différence de potentiel, 5 entre la première extrémité (3) de la première ligne électriquement conductrice (1) et la seconde extrémité (5) de la première ligne électriquement conductrice (1), et les moyens éventuels pour appliquer une différence de potentiel, entre la première extrémité 10 (4) de la seconde ligne électriquement conductrice (2) et la seconde extrémité (6) de la seconde ligne électriquement conductrice (2) comportent des moyens pour augmenter ou diminuer cette(ces) différence(s) de potentiel de manière continue ou par incrément, de 15 manière manuelle ou automatique, par exemple en fonction de la valeur mesurée de la première différence de potentiel de fuite, respectivement de la deuxième différence de potentiel de fuite.

20 7. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les moyens (9, 10, 11) pour appliquer une différence de potentiel, entre la première extrémité (3) de la première ligne électriquement conductrice (1) et la seconde extrémité 25 (5) de la première ligne électriquement conductrice (1) et les moyens pour appliquer une différence de potentiel, dite première différence de potentiel de polarisation entre la première zone (19) de la surface du nanofil (15) et la deuxième zone (20) de la surface 30 du nanofil (15), dans le sens de la longueur du nanofil

sont constitués par un même premier générateur de tension.

8. Dispositif selon l'une quelconque des
5 revendications précédentes, dans lequel les moyens
éventuels pour appliquer une différence de potentiel,
entre la première extrémité (4) de la seconde ligne
électriquement conductrice (2) et la seconde extrémité
(6) de la seconde ligne électriquement conductrice (2),
10 et les moyens éventuels pour appliquer une différence
de potentiel, dite deuxième différence de potentiel de
polarisation entre la deuxième zone (20) de la surface
du nanofil (15) et la première zone (19) de la surface
du nanofil (15) dans le sens de la longueur du nanofil
15 sont constitués par un même deuxième générateur de
tension.

9. Dispositif selon la revendication 7 ou 8,
dans lequel ledit premier et ledit deuxième générateur
20 de tension sont remplacés par un seul générateur de
tension qui peut appliquer une différence de potentiel,
entre la première extrémité (3) de la première ligne
électriquement conductrice (1) et la seconde extrémité
(5) de la première ligne électriquement conductrice (1)
25 et une différence de potentiel, entre la première zone
(19) de la surface du nanofil (15) et la deuxième zone
(20) de la surface du nanofil (15), dans le sens de la
longueur du nanofil, ou bien qui peut appliquer une
différence de potentiel, entre la première extrémité
30 (4) de la seconde ligne électriquement conductrice (2)
et la seconde extrémité (6) de la seconde ligne

électriquement conductrice (2) , et une différence de potentiel, entre la deuxième zone (20) de la surface du nanofil et la première zone (19) de la surface du nanofil, dans le sens de la longueur du nanofil.

5

10. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, qui comprend plusieurs premières bandes électriquement conductrices et secondes bandes électriquement conductrices.

10

11. Procédé pour former, sur au moins un nanofil en un semi-conducteur, un alliage de ce semi-conducteur avec un métal ou métalloïde, dans lequel on réalise les étapes successives suivantes :

15

a) on dépose ledit au moins un nanofil (15) en un semi-conducteur sur un substrat, par exemple une couche, en un matériau électriquement isolant, éventuellement disposé sur un autre substrat en un matériau différent dudit matériau électriquement isolant ;

20

b) on met en contact une première zone (19) de la surface du nanofil avec une partie centrale (17) d'une première bande électriquement conductrice (7), en un métal ou un métalloïde apte à former un alliage avec le semi-conducteur du nanofil, formant une partie rétrécie entre une première extrémité (3) et une seconde extrémité (5) d'une première ligne électriquement conductrice (1), et on met en contact une deuxième zone (20) de la surface du nanofil (15),
25
30
espacée de la première zone (19) dans le sens de la longueur du nanofil avec une partie centrale (18) d'une

seconde bande électriquement conductrice (8), en un métal ou un métalloïde apte à former un alliage avec le semi-conducteur du nanofil (15) , formant une partie rétrécie entre une première extrémité (4) et une
5 seconde extrémité (6) d'une seconde ligne électriquement conductrice (2) ;

c) on applique une différence de potentiel dite première différence de potentiel de polarisation entre la première zone (19) de la surface du nanofil et
10 la deuxième zone (20) de la surface du nanofil (15), dans le sens de la longueur du nanofil ;

d) on applique une différence de potentiel dite première différence de potentiel de chauffage, entre la première extrémité (3) de la première ligne électriquement conductrice (1) et la seconde extrémité
15 (5) de la première ligne électriquement conductrice (1), tout en maintenant constante la première différence de potentiel de polarisation, et on mesure simultanément une différence de potentiel, dite
20 première différence de potentiel de fuite, de part et d'autre d'une résistance R en série avec le nanofil (15) située entre la seconde extrémité (6) de la seconde ligne électriquement conductrice et la terre ;

e) on augmente la première différence de
25 potentiel de chauffage de manière continue ou par incrément, de manière manuelle ou automatique, généralement à partir d'une valeur voisine de zéro, jusqu'à ce que l'on observe un saut de la première
différence de potentiel de fuite indiquant que la
30 première différence de potentiel de chauffage est alors suffisante pour provoquer un échauffement de la partie

centrale (17) de la première bande électriquement conductrice (7) et de la première zone (19) de la surface du nanofil, la diffusion du métal ou du métalloïde dans et le long du nanofil et la formation de l'alliage.

12. Procédé selon la revendication 11, dans lequel le semi-conducteur est le silicium, éventuellement dopé.

13. Procédé selon l'une quelconque des revendications 11 et 12, dans lequel les nanofils ont une longueur de 0,5 à 10 μm et un diamètre de 20 à 50 nm.

14. Procédé selon l'une quelconque des revendications 11 à 13, dans lequel le substrat en un matériau électriquement isolant est une couche en silice éventuellement disposée sur un substrat en silicium fortement dopé ; un substrat, par exemple une couche en nitrure de silicium ; ou un substrat, par exemple une couche d'alumine.

15. Procédé selon l'une quelconque des revendications 11 à 14, dans lequel on dépose plusieurs nanofils sur le substrat en un matériau électriquement isolant, lesdits nanofils étant disposés de manière aléatoire, leur position étant éventuellement repérée à l'aide de marques préalablement réalisées sur le substrat ; ou selon des structures, motifs ordonnés,

par exemple sous la forme de rangées ordonnées de nanofils.

16. Procédé selon l'une quelconque des revendications 11 à 15, dans lequel le métal est choisi parmi le nickel et le platine.

17. Procédé selon l'une quelconque des revendications 11 à 16, dans lequel en fonction de la première différence de potentiel de fuite mesurée, on modifie la première différence de potentiel de chauffage.

18. Procédé selon l'une quelconque des revendications 11 à 17, dans lequel, à l'issue de l'étape e), on réalise les étapes f), g), h) suivantes :

f) on applique une différence de potentiel dite deuxième différence de potentiel de polarisation entre la deuxième zone (20) de la surface du nanofil et la première zone (19) de la surface du nanofil, dans le sens de la longueur du nanofil ;

g) on applique une différence de potentiel dite deuxième différence de potentiel de chauffage, entre la première extrémité (4) de la seconde ligne électriquement conductrice (2) et la seconde extrémité (6) de la seconde ligne électriquement conductrice (2), tout en maintenant constante la deuxième différence de potentiel de polarisation, et on mesure simultanément une différence de potentiel, dite deuxième différence de potentiel de fuite, de part et d'autre d'une

résistance R' en série avec le nanofil (15) située entre la seconde extrémité (6) de la première ligne électriquement conductrice et la terre ;

5 h) on augmente la deuxième différence de potentiel de chauffage de manière continue ou par
incrément, de manière manuelle ou automatique, généralement à partir d'une valeur généralement voisine
de zéro, jusqu'à ce que l'on observe un saut de la
10 deuxième différence de potentiel de fuite indiquant que la deuxième différence de potentiel de chauffage est
alors suffisante pour provoquer un échauffement de la
partie centrale (18) de la seconde bande électriquement
conductrice (8) et de la deuxième zone (20) de la
surface du nanofil, la diffusion du métal ou du
15 métalloïde dans et le long du nanofil et la formation
de l'alliage.

19. Procédé selon la revendication 18, dans
lequel en fonction de la deuxième différence de
20 potentiel de fuite mesurée, on modifie la deuxième
différence de potentiel de chauffage.

20. Procédé selon l'une quelconque des
revendications 17 et 19, dans lequel la première
25 différence de potentiel de chauffage et/ou la deuxième
différence de potentiel de chauffage est(sont)
modifiée(s) afin d'obtenir une première portion en
alliage et/ou une deuxième portion en alliage de
longueur(s) déterminée(s) (32, 33) le long du nanofil
30 (15, 31) à partir respectivement de la première zone

(19, 34) de la surface du nanofil et de la deuxième zone (20, 35) de la surface du nanofil.

21. Procédé selon la revendication 20, dans
5 lequel la portion en semi-conducteur (38) de la longueur du nanofil entre la première portion en alliage (32) et la deuxième portion en alliage (33) est le canal d'un transistor.

10 22. Procédé selon la revendication 21, dans lequel on établit une courbe d'étalonnage qui donne pour chaque valeur du (des) courant(s) de fuite la longueur (39) du canal du transistor et on règle le premier et/ou le deuxième potentiel de chauffage de
15 manière à obtenir la longueur de canal souhaitée.

23. Procédé selon l'une quelconque ces revendications 11 à 22, dans lequel les bandes électriquement conductrices sont définies directement
20 sur les nanofils, par exemple par un procédé de lithographie.

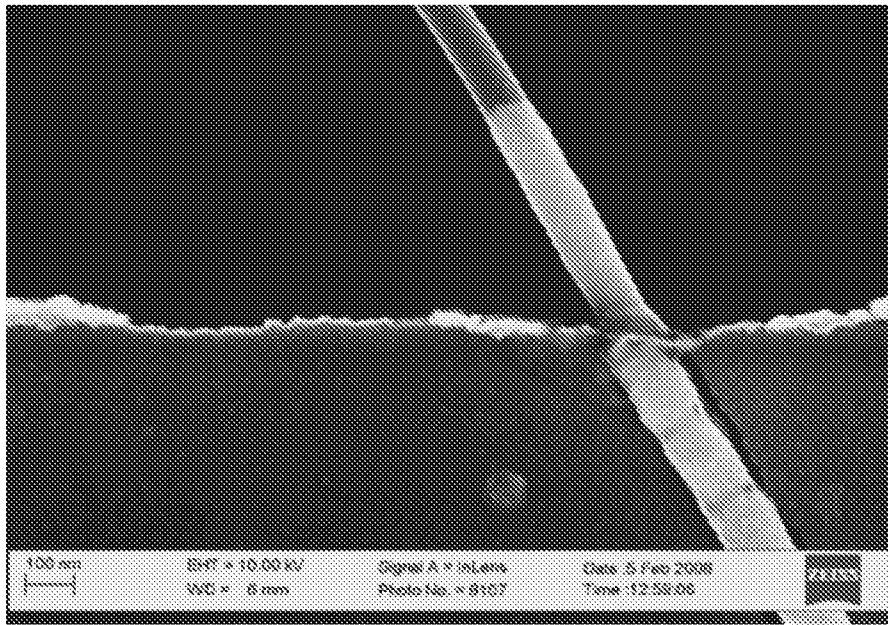


FIG.1

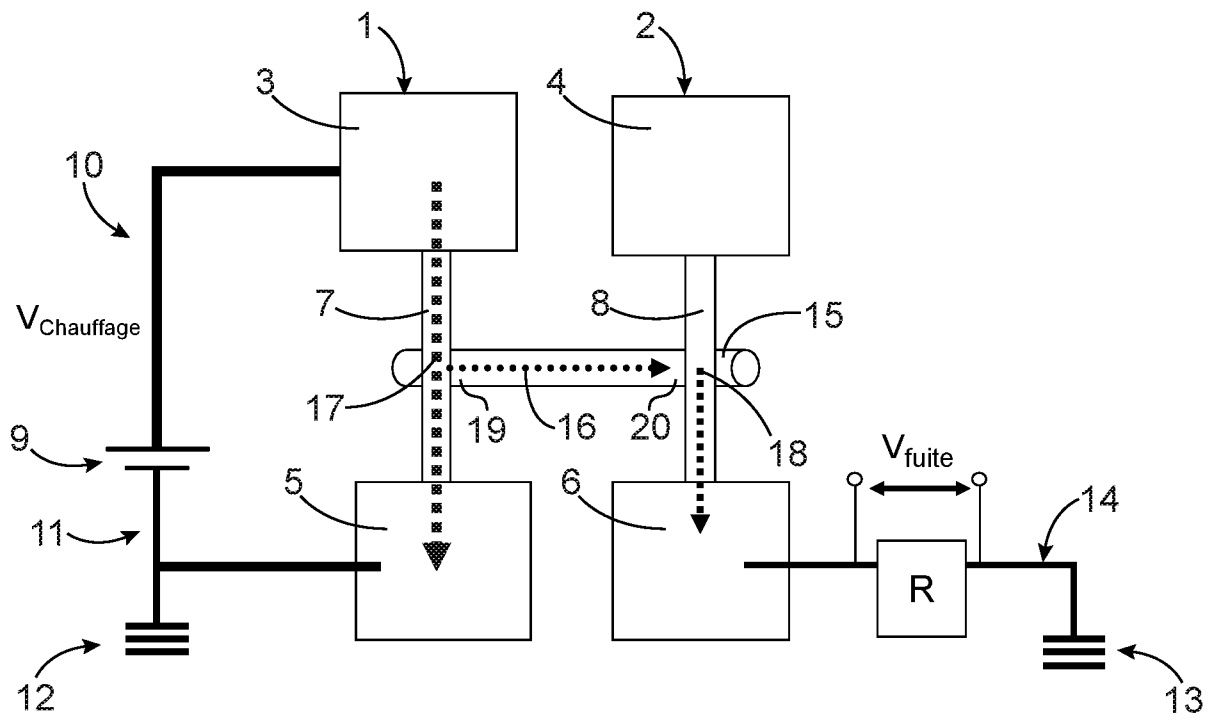


FIG.2

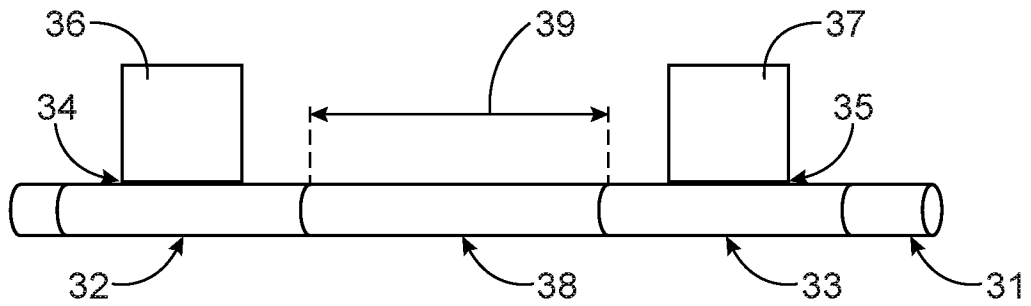


FIG.3

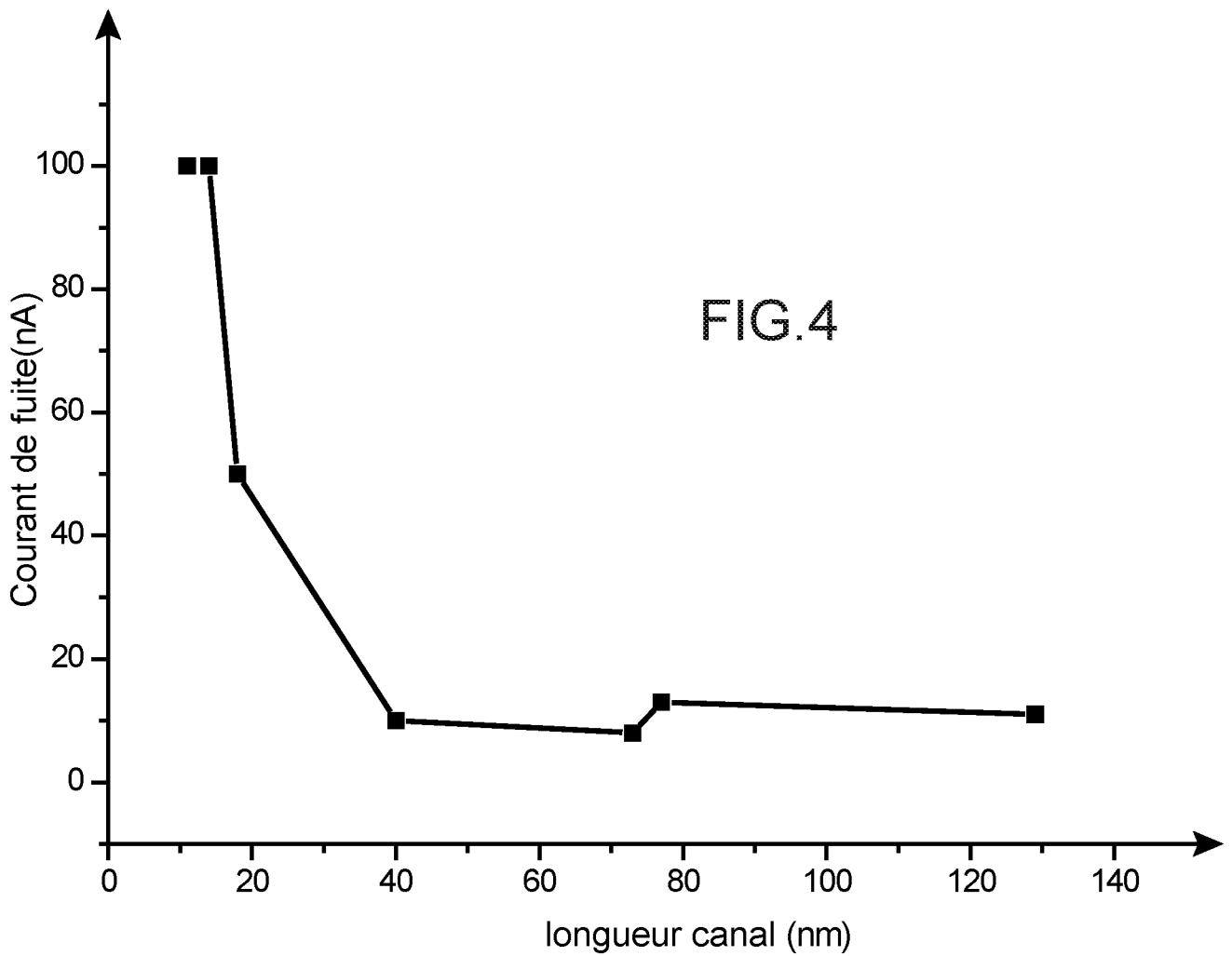


FIG.4

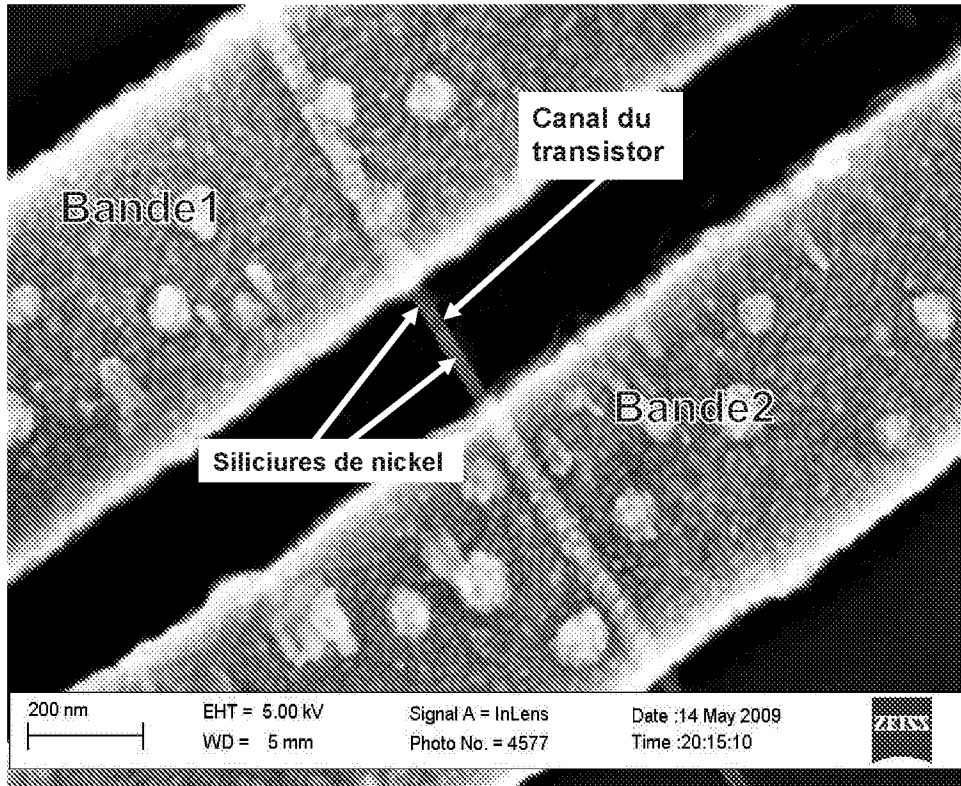


FIG.5

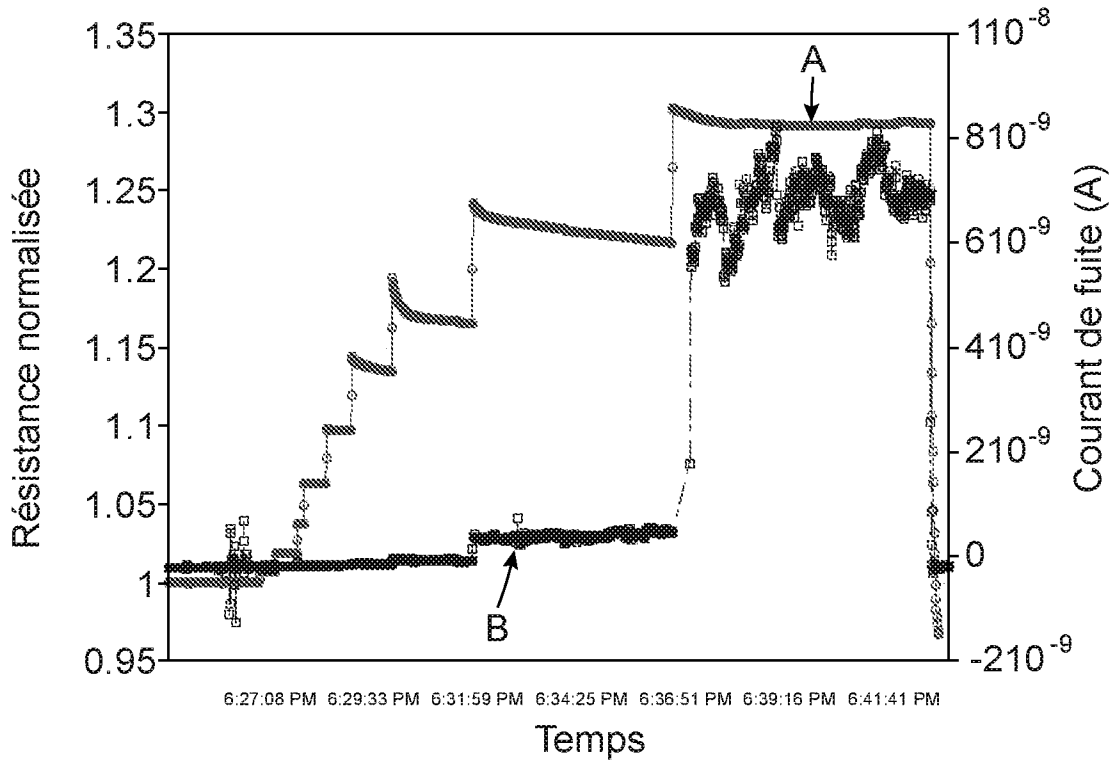


FIG.6

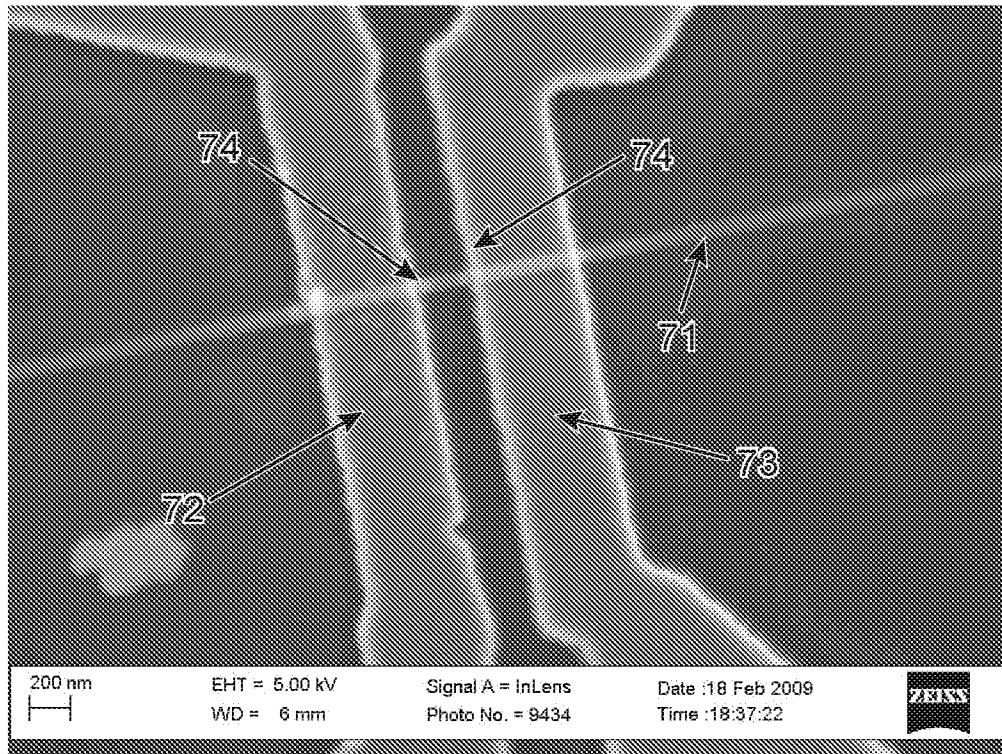


FIG.7

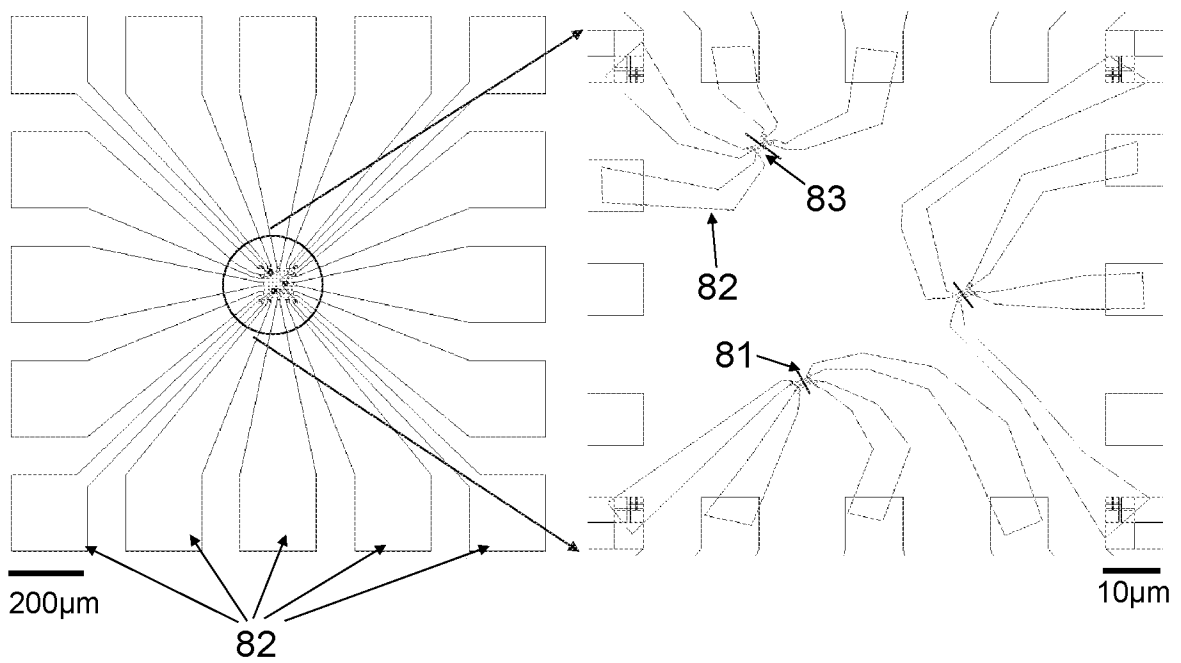


FIG.8A

FIG.8B

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2011/061924

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 INV. H01L21/335 H01L29/06 H01L29/08 H01L29/45 H01L29/775
 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)
 H01L
 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

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2008/246020 A1 (KAWASHIMA TAKAHIRO [JP] ET AL) 9 October 2008 (2008-10-09) Figures 8b, 11a, 11b et texte correspondente. -----	1-23
A	EP 1 900 681 A1 (IMEC INTER UNI MICRO ELECTR [BE]) 19 March 2008 (2008-03-19) Figures 2, 3 et texte correspondente. -----	1-23
A	KR 100 844 094 B1 (IND ACADEMIC COOP [KR]; KOREA RES INST CHEM TECH [KR]; NAT UNIV CHONBU) 4 July 2008 (2008-07-04) figures 4, 5, 10, 11 -----	1-23
A	WO 2005/093831 A1 (HARVARD COLLEGE [US]; LIEBER CHARLES M [US]; WU YUE [US]; XIANG JIE [U]) 6 October 2005 (2005-10-06) Figure 3A et texte correspondente. -----	1-23

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	"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
"E" earlier document but published on or after the international filing date	"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
"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)	"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.
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"&" document member of the same patent family
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 19 December 2011	Date of mailing of the international search report 27/12/2011
---	--

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 Dauw, Xavier
--	--

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2011/061924

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2008246020	A1	09-10-2008	NONE

EP 1900681	A1	19-03-2008	EP 1900681 A1 19-03-2008
			JP 2008103702 A 01-05-2008
			US 2008067607 A1 20-03-2008

KR 100844094	B1	04-07-2008	NONE

WO 2005093831	A1	06-10-2005	NONE

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2011/061924

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. H01L21/335 H01L29/06 H01L29/08 H01L29/45 H01L29/775 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE		
Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) H01L		
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) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	US 2008/246020 A1 (KAWASHIMA TAKAHIRO [JP] ET AL) 9 octobre 2008 (2008-10-09) Figures 8b, 11a, 11b et texte correspondente. -----	1-23
A	EP 1 900 681 A1 (IMEC INTER UNI MICRO ELECTR [BE]) 19 mars 2008 (2008-03-19) Figures 2, 3 et texte correspondente. -----	1-23
A	KR 100 844 094 B1 (IND ACADEMIC COOP [KR]; KOREA RES INST CHEM TECH [KR]; NAT UNIV CHONBU) 4 juillet 2008 (2008-07-04) figures 4, 5, 10, 11 -----	1-23
A	WO 2005/093831 A1 (HARVARD COLLEGE [US]; LIEBER CHARLES M [US]; WU YUE [US]; XIANG JIE [U]) 6 octobre 2005 (2005-10-06) Figure 3A et texte correspondente. -----	1-23
<input type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents <input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités:		
"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "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) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée	"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 "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 "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 "&" document qui fait partie de la même famille de brevets	
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée 19 décembre 2011		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 27/12/2011
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Dauw, Xavier

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2011/061924

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2008246020	A1	09-10-2008	AUCUN	
EP 1900681	A1	19-03-2008	EP 1900681 A1	19-03-2008
			JP 2008103702 A	01-05-2008
			US 2008067607 A1	20-03-2008
KR 100844094	B1	04-07-2008	AUCUN	
WO 2005093831	A1	06-10-2005	AUCUN	