

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 02.02.22.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 04.08.23 Bulletin 23/31.

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

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : Commissariat à l'énergie atomique et
aux énergies alternatives Etablissement public à carac-
tère industriel et commercial — FR, Centre national de
la recherche scientifique Etablissement public à carac-
tère scientifique et technique — FR et UNIVERSITE
GRENOBLE ALPES Etablissement public national à
caractère scientifique, culturel et professionnel — FR.

⑦2 Inventeur(s) : GREZES Cécile, ATTANE Jean-
Philippe, BIBES Manuel et VILA Laurent.

⑦3 Titulaire(s) : Commissariat à l'énergie atomique et aux
énergies alternatives Etablissement public à caractère indus-
triel et commercial, Centre national de la recherche scientifique
Etablissement public à caractère scientifique et technique,
UNIVERSITE GRENOBLE ALPES Etablissement public natio-
nal à caractère scientifique, culturel et professionnel.

⑦4 Mandataire(s) : Lavoix.

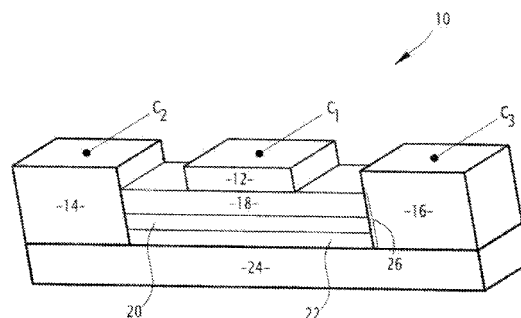
⑤4 Transistor non-volatil à effet de champ à base de gaz bidimensionnel d'électrons.

⑤7 Transistor non-volatil à effet de champ à base de gaz
bidimensionnel d'électrons

La présente invention concerne un transistor (10) non-
volatil à effet de champ comprenant :

- une électrode de grille comportant un premier contact (C1),
- une source (14) comprenant un deuxième contact (C2),
- un drain (16) comportant un troisième contact (C3),
- un canal (20) entre le drain (16) et la source (14) consti-
tué d'un gaz bidimensionnel d'électrons,
- un sous-ensemble à états rémanents (18) présentant
deux états rémanents contrôlables électriquement compor-
tant au moins une couche d'oxyde, et
- une couche réductrice (22) réalisée en au moins un
matériau réducteur de type métal présentant une concentra-
tion atomique en éléments métalliques supérieure à 50%,
l'application d'une tension entre le premier contact (C1)
et un autre contact (C2, C3) entraînant une modulation non-
volatile de la conductivité du gaz bidimensionnel.

Figure pour l'abrégé : figure 1



Description

Titre de l'invention : Transistor non-volatile à effet de champ à base de gaz bidimensionnel d'électrons

- [0001] La présente invention concerne un transistor non-volatile à effet de champ à gaz bidimensionnel d'électrons.
- [0002] Un transistor à effet de champ est souvent désigné par l'acronyme FET qui renvoie à la dénomination anglaise correspondante de « *Field-Effect Transistor* ». Un tel transistor est souvent utilisé comme commutateur ou amplificateur.
- [0003] Un transistor à effet de champ est un dispositif unipolaire à trois terminaux (drain, source et grille) reposant sur l'action d'un champ électrique sur la conductivité d'un canal situé entre le drain et la source. Dans le canal, les porteurs, électrons ou trous, sont libres de se mouvoir entre la source et le drain sous l'action d'une tension appliquée entre ces deux terminaux. Le contrôle de la conductance du canal se fait par l'application d'une tension sur la grille. De nombreux types de transistors à effet de champ existent selon la nature du porteur (électron ou trou) ou la nature du contrôle électrique exercé sur le canal.
- [0004] Les transistors à effet de champs sont actuellement construits à l'aide de divers matériaux semi-conducteurs, dont surtout des matériaux à base de silicium monocristallin. D'autres matériaux sont néanmoins utilisés, tels que le silicium amorphe, le silicium polycristallin, l'arséniure de gallium ou le nitrure de gallium.
- [0005] Dans un transistor FET, une alimentation électrique permet de maintenir l'état passant (c'est-à-dire une conductivité du canal non nulle) ou non-passant (conductivité du canal nulle) du transistor, puisque cet état dépend de la tension appliquée à la grille. Cet état est volatil : si l'alimentation est coupée, la tension appliquée sur la grille devient nécessairement nulle, et l'état n'est pas conservé. L'application d'une tension de manière constante pour conserver l'état mémoire entraîne une consommation d'énergie pour maintenir l'état du transistor. Cette consommation est dite statique car elle est liée à l'apparition de courants de fuite, et non au processus dynamique d'écriture ou de lecture de la mémoire.
- [0006] La création de transistors non-volatils à effet de champ, donc capables de maintenir l'état du transistor en l'absence d'alimentation électrique, permet d'éliminer la consommation d'énergie statique, et donc de réduire la consommation d'énergie. La non-volatilité peut également permettre d'envisager un transistor avec des fonctionnalités supplémentaires, comme une fonction mémoire ou une fonction de calcul logique.
- [0007] Plusieurs transistors non-volatils à effet de champ ont été proposés, basés sur des

transistors semiconducteurs. En particulier, des travaux portent sur le développement du transistor à effet de champ ferroélectrique, plus souvent désigné sous l'abréviation Fe-FET qui renvoie à la dénomination anglaise correspondante de « *Ferroelectric Field-Effect Transistor* ». Le Fe-FET comprend un élément ferroélectrique entre la grille et le canal drain-source permettant de maintenir l'état passant ou non-passant en l'absence d'alimentation électrique.

- [0008] Les transistors Fe-FET connus souffrent notamment d'une endurance et d'un contraste entre l'état passant et l'état non-passant (parfois désigné sous l'appellation « contraste ON/OFF ») limités.
- [0009] Il existe donc un besoin pour un transistor non-volatile présentant une meilleure endurance et un contraste amélioré entre l'état passant et l'état non-passant.
- [0010] A cet effet, la description décrit un transistor non-volatile à effet de champ, le transistor comprenant une première électrode dite électrode de grille comportant un premier contact, une deuxième électrode dite source, la source comprenant un deuxième contact, une troisième électrode dite drain, le drain comportant un troisième contact, un canal entre le drain et la source, le canal étant constitué d'un gaz bidimensionnel d'électrons, un sous-ensemble à états rémanents, le sous-ensemble à états rémanents présentant au moins deux états rémanents contrôlables électriquement, le sous-ensemble à états rémanents étant en contact avec le canal, le sous-ensemble à états rémanents comportant au moins une couche d'oxyde, et une couche réductrice réalisée en au moins un matériau réducteur de type métal, chaque matériau réducteur de type métal présentant une concentration atomique en éléments métalliques supérieure ou égale à 50%, ces éléments métalliques étant choisis dans les colonnes 3d, 4d, 5d, 5f de la classification périodique. La première électrode est en contact avec le sous-ensemble à états rémanents et l'application d'une tension entre le premier contact et un contact parmi le deuxième contact et le troisième contact entraîne une modulation non-volatile de la conductivité du gaz bidimensionnel constituant le canal.
- [0011] La couche réductrice permet de créer le gaz bidimensionnel d'électrons formant le canal à l'interface entre la couche réductrice et le sous-ensemble à états rémanents.
- [0012] Selon des modes de réalisation particuliers, le transistor non-volatile présente une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prise(s) isolément ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles :
- [0013] - la couche réductrice est une monocouche de matériau réducteur de type métal ou un multicouche de matériaux réducteurs de type métal, ce ou ces matériaux réducteurs présentant chacun une concentration atomique en éléments métalliques supérieure ou égale à 50%, ce ou ces éléments métalliques étant choisis dans les colonnes 3d, 4d, 5d, 5f de la classification périodique.
- [0014] - le sous-ensemble à états rémanents comprend au moins une couche ou multicouche

diélectrique non-volatile à contrôle électrique, par effet ferroélectrique, par effet de charge piégée, par effet de migration d'ions ou par combinaison de plusieurs de ces effets.

- [0015] - chaque matériau réducteur de type métal présente une concentration atomique en éléments métalliques supérieure ou égale à 80%.
- [0016] - chaque élément métallique est choisi dans la liste constituée de l'aluminium, du tantale, de l'yttrium, du magnésium et du ruthénium.
- [0017] - la couche réductrice présente une épaisseur inférieure ou égale à 15 nanomètres et de préférence inférieure ou égale à 10 nanomètres.
- [0018] - le transistor comporte un substrat sur lequel repose le drain, la source et la couche réductrice, la couche réductrice, le canal et le sous-ensemble à états rémanents formant dans cet ordre un empilement, et la première électrode repose sur le sous-ensemble à états rémanents.
- [0019] - le sous-ensemble à états rémanents repose sur la première électrode, le drain, le canal et la source reposent sur le sous-ensemble à états rémanents, et la couche réductrice est disposée sur le canal.
- [0020] - le transistor non-volatil comporte, en outre, une couche de protection sur la couche réductrice.
- [0021] - le sous-ensemble à états rémanents comporte une couche choisie parmi une couche d'oxyde en oxydes pérovskites, une couche d'oxyde en $(\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_2$, x variant entre 0 et 1, éventuellement dopée, et une couche en poly(fluorure de vinylidène).
- [0022] - le transistor comporte une unité de lecture, l'unité de lecture comportant une sous-unité d'application d'une tension entre le drain et la source et une sous-unité de mesure du courant entre le drain et la source.
- [0023] - la source et le drain sont en contact avec les extrémités du canal.
- [0024] Des caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif, et faite en référence aux dessins annexés, sur lesquels :
- [0025] - [Fig.1] la [Fig.1] est une représentation schématique d'un exemple de transistor non volatil à effet de champ à gaz bidimensionnel d'électrons,
- [0026] - [Fig.2] la [Fig.2] est une représentation schématique d'un autre exemple de transistor non volatil à effet de champ à gaz bidimensionnel d'électrons,
- [0027] - [Fig.3] la [Fig.3] est un graphe montrant la dépendance de la résistance entre deux contacts en fonction d'une tension appliquée,
- [0028] - [Fig.4] la [Fig.4] est un graphe illustrant la caractéristique courant-tension d'un exemple de transistor dans les états passants et non-passants, et
- [0029] - [Fig.5] la [Fig.5] est une représentation schématique d'un exemple de transistor avec ses unités de lecture et d'écriture.

- [0030] Un transistor 10 est illustré sur les figures 1 et 2.
- [0031] Le transistor 10 est un transistor non-volatile à effet de champ.
- [0032] Le transistor 10 comporte trois électrodes, une première électrode dite électrode de grille 12 comportant un premier contact C1, une deuxième électrode 14 dite source 14 et comportant un deuxième contact C2 et une troisième électrode 16 dite drain 16 et comportant un troisième contact C3.
- [0033] Ces électrodes sont avantageusement de nature métallique, ou en matériau semi-conducteur fortement dopé.
- [0034] Le transistor 10 comporte également un sous-ensemble à états rémanents 18, un canal 20 constitué par un gaz bidimensionnel d'électrons et situé entre le drain 16 et la source 14 et une couche réductrice 22.
- [0035] Comme visible sur la [Fig.5], le transistor 10 comporte également une unité de lecture 40 et une unité d'écriture 42.
- [0036] L'unité de lecture 40 comporte également une sous-unité d'application d'une tension 44 et une sous-unité de mesure du courant 46.
- [0037] Deux agencements distincts des couches du transistor 10 sont proposés respectivement à la [Fig.1] et à la [Fig.2].
- [0038] Dans la suite, les couches d'un empilement sont des couches empilées selon une direction d'empilement. Il est également défini des notions relatives de bas et de haut par rapport à la direction d'empilement. Une couche est située plus bas qu'une autre couche si elle est plus basse dans la représentation sur la feuille de la [Fig.1].
- [0039] Dans l'exemple de la [Fig.1], le transistor 10 non-volatile comporte un substrat 24 sur lequel repose le drain 16, la source 14 et un empilement 26 de couches, comprenant la couche réductrice 22, le canal 20 et le sous-ensemble à états rémanents 18, empilés dans cet ordre lorsque l'empilement 26 est parcouru depuis le bas vers le haut (le bas correspondant au substrat dans ce cas).
- [0040] Enfin, l'épaisseur d'une couche est définie comme la dimension le long de la direction d'empilement de la couche, c'est-à-dire la distance entre ses deux faces.
- [0041] L'électrode de grille 12 est en contact avec le sous-ensemble à états rémanents 18.
- [0042] L'ordre des couches de l'empilement 26 peut être inversé comme le montre la [Fig.2].
- [0043] Dans le cas de la [Fig.2], le sous-ensemble à états rémanents 18 repose sur l'électrode de grille 12. Le drain 16, le canal 20 et la source 14 reposent sur le sous-ensemble à états rémanents 18.
- [0044] Le canal 20 et la couche réductrice 22 forment dans cet ordre un empilement 28 en parcourant l'empilement 28 depuis le bas vers le haut.
- [0045] En outre, de manière optionnelle, l'empilement 28 comporte une couche de protection 30 reposant sur la couche réductrice 22.

- [0046] La couche de protection 30 est réalisée en matériaux isolants, caractérisés par une conductance nulle ou quasi nulle, et permettant de protéger l'empilement 28, notamment de l'oxydation.
- [0047] La couche de protection 30 est, par exemple, en SiO_2 .
- [0048] Dans les deux cas illustrés, la source 14 et le drain 16 sont en contact avec une extrémité respective du canal 20.
- [0049] Le sous-ensemble à états rémanents 18 présente au moins deux états rémanents contrôlables électriquement. Le contrôle électrique est ici obtenu par application d'une tension entre le premier contact C1 et le deuxième ou le troisième contacts C2 ou C3.
- [0050] Autrement formulé, le sous-ensemble à états rémanents 18 est caractérisé par une relation non-linéaire entre la tension appliquée et la charge stockée apparente suivant un cycle d'hystérésis, et donnant lieu au minimum à deux états rémanents.
- [0051] Pour cela, le sous-ensemble à états rémanents 18 est une couche diélectrique ou un empilement de couches diélectriques non-volatile à contrôle électrique par effet ferroélectrique, par effet de charge piégée, par effet de migration d'ions ou par combinaison de plusieurs de ces effets. Les états rémanents correspondent à des variations de la polarisation ferroélectrique, de la quantité de charges piégées, ou des positions des ions, ou des combinaisons de ces variations.
- [0052] Plus précisément, le sous-ensemble comporte au moins une couche d'oxyde réalisée en un matériau choisi parmi les oxydes pérovskites, ou des oxydes basés sur HfO_2 , possiblement dopé avec d'autres éléments, tels que du $(\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_2$ ou du $(\text{Hf}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{O}_2$ (x variant entre 0 et 1), ou leurs alliages, ou le poly(fluorure de vinylidène).
- [0053] Les oxydes pérovskites présentent une structure de type ABO_3 où A et B sont des cations. Le BaTiO_3 , le PZT (c'est-à-dire $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ avec x variant entre 0 et 1), le PMN-PT (c'est-à-dire $[1-x]\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - x\text{PbTiO}_3$ avec x variant entre 0 et 1), le BiFeO_3 (éventuellement dopé, par exemple en terres rares sur le site du Bi, ou en Mn sur le site du Fe), le SrTiO_3 (éventuellement dopé), le KTiO_3 (éventuellement dopé), le $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ (éventuellement dopé) ou le YMnO_3 (éventuellement dopé) sont des exemples de tels matériaux.
- [0054] L'utilisation du matériau diélectrique pour réaliser le sous-ensemble à états rémanents 18 permet de contrôler électriquement de manière non-volatile la conductivité du canal 20.
- [0055] Dans chacun des exemples précédents, l'existence des états rémanents provient d'un effet ferroélectrique, d'un effet de charge piégée, d'un effet de migration d'ions ou d'une combinaison de plusieurs de ces effets. En pratique, l'effet prédominant dépend des matériaux et des conditions de dépôt des couches constituant le sous-ensemble à états rémanents 18. Selon l'exemple décrit, le champ électrique coercitif de l'élément diélectrique et son épaisseur sont suffisamment faibles pour que le dispositif d'écriture

14 puisse écrire les états rémanents à des tensions compatibles avec les technologies microélectronique, c'est-à-dire des tensions inférieures à 10 Volts (<10 V). Une épaisseur inférieure à 100 nm et avantageusement inférieure à 50 nm dans les matériaux précités permet d'obtenir de telles propriétés. Le sous-ensemble à états rémanents 18 est également endurant au cyclage, typiquement capable de supporter au moins 10^4 cycles.

- [0056] Le canal 20 est constitué par un gaz bidimensionnel d'électrons, c'est-à-dire un gaz confiné d'électrons qui se forme à l'interface entre deux couches, alors qu'il n'existe pas dans le volume des matériaux pris séparément.
- [0057] Le canal 20 est donc un gaz d'électrons se formant à l'interface entre le sous-ensemble à états rémanents 18 et la couche réductrice 22. Il comporte une présente une forte densité de porteurs (typiquement supérieure ou égale à 10^{10} cm⁻²). Le confinement est tel qu'il peut être considéré que ce gaz est bidimensionnel, seul le voisinage de l'interface étant conducteur.
- [0058] Le gaz d'électron du canal 20 étant créé à l'interface entre le sous-ensemble à états rémanents 18 et la couche réductrice 22, ses propriétés et notamment sa résistance dépendent directement de l'état du sous-ensemble à états rémanents 18. La résistance du gaz bidimensionnel d'électrons et donc du canal 20 est donc modulable électriquement de manière non-volatile selon l'état du sous-ensemble à états rémanents 18. Il est ainsi possible de moduler la résistance du canal 20 en choisissant l'état rémanent du sous-ensemble à états rémanents 18.
- [0059] La couche réductrice 22 permet de créer le gaz bidimensionnel d'électrons formant le canal à l'interface entre la couche réductrice 22 et le sous-ensemble à états rémanents 18.
- [0060] La couche réductrice 22 est réalisée en un matériau réducteur présentant une concentration atomique en éléments métalliques supérieure ou égale à 50%, de préférence supérieure ou égale à 80%.
- [0061] Par définition, la concentration atomique est le rapport entre le nombre d'atomes d'éléments métalliques et le nombre d'atomes total.
- [0062] En ce sens, la couche réductrice 22 est une couche réductrice que l'on peut qualifier de type métal.
- [0063] Chaque élément métallique de la couche réductrice 22 est choisi dans les colonnes 3d, 4d, 5d, 5f de la classification périodique, ou une combinaison de métaux choisis dans les mêmes colonnes de la classification périodique.
- [0064] A titre d'exemple particulier, chaque élément métallique est choisi parmi Al, Ta, Ru, Pt, W, Ir, Mo, Ti, Y, Au, ou un alliage de ces éléments tel que PtW.
- [0065] En variante, la couche réductrice 22 est une multicouche. Dans ce cas, chaque couche de la dite multicouche possède, là encore, une concentration atomique en éléments mé-

tallique supérieure ou égale à 50%, de préférence supérieure ou égale à 80%.

- [0066] La couche réductrice 22 permet la formation du gaz bidimensionnel d'électrons au contact avec le sous-ensemble à états rémanents 18. En ce sens, le canal 20 formé par un gaz bidimensionnel d'électrons est bien différent du canal d'un transistor classique à effet de champ, dans lequel il n'y a pas de couche réductrice. Egalement, dans le canal d'un transistor classique à effet de champ, les porteurs apparaissent de manière réversible dans le matériau semiconducteur (en général en Si dopé), par application d'une tension de grille créant un champ électrostatique.
- [0067] La couche réductrice 22 présente une épaisseur inférieure ou égale à 15 nanomètres (nm).
- [0068] Cela permet que la couche réductrice 22, partiellement ou complètement oxydée au contact du sous-ensemble à états rémanents 18, présente une conductivité plus faible que celle du gaz bidimensionnel d'électrons. L'épaisseur de la couche réductrice 22 est de préférence choisie de manière à ce qu'elle soit complètement oxydée par mise en contact avec le sous-ensemble à états rémanents 18, de manière à ce que sa conductivité soit la plus faible possible.
- [0069] Comme indiqué précédemment, la source 14 et le drain 16 sont en contact avec une extrémité respective du canal 20, et ainsi connectés électriquement l'une à l'autre via ce canal 20.
- [0070] Chacune des électrodes 12, 14 et 16 sont de préférence réalisées en matériau conducteur métallique ou semi-conducteur dopé, de manière à présenter une conductivité élevée.
- [0071] Le fonctionnement du transistor 10 est maintenant décrit en référence aux figures 3 et 4.
- [0072] Dans un premier exemple de fonctionnement, le sous-ensemble à états rémanents 18 présente deux états notés A et B.
- [0073] Cela apparaît notamment sur la [Fig.3], qui présente la dépendance de la résistance entre le deuxième contact C2 et le troisième contact C3 en fonction de la tension appliquée entre le premier contact C1 et le deuxième contact C2 (tension de grille V_g). Il est bien observé que la variation de conductivité du canal 20 en fonction de la tension de grille présente une hystérésis, correspondant aux 2 états rémanents A et B du sous-ensemble.
- [0074] Selon ce premier exemple de fonctionnement, l'écriture est réalisée par l'unité d'écriture en appliquant une tension entre le premier contact C1 et le deuxième contact C2.
- [0075] L'écriture pourrait également être réalisée en remplaçant le deuxième contact C2 par le troisième contact C3.
- [0076] Du point de vue physique, la conductivité du canal 20 est ici modulée de manière

non-volatile en fonction de l'état rémanent du sous-ensemble à états rémanents 18 par l'application d'une tension entre le premier contact C1 et le deuxième contact C2.

- [0077] Dans cet exemple de fonctionnement, l'application d'une tension négative entre le premier contact C1 et le deuxième contact C2 initialise le sous-ensemble à états rémanents 18 dans l'état rémanent A, résultant en une faible conductivité du canal 20. Inversement, l'application d'une tension positive induit une forte conductivité du canal 20, correspondant à l'état rémanent B du sous-ensemble à états rémanents 18.
- [0078] Selon le matériau utilisé, le signe des tensions donnant les états rémanents de haute et basse résistances peut être inversé. Ainsi, ce peut être l'application d'une tension positive entre le premier contact C1 et le deuxième contact C2 qui résulte dans un état rémanent à faible conductivité du canal 20. Dans ce cas, c'est l'application d'une tension négative qui induira un état rémanent correspondant à une forte conductivité du canal 20.
- [0079] Dans ce premier exemple de fonctionnement, l'unité de lecture 40 lit de manière non-destructive l'état rémanent en appliquant une tension entre le deuxième contact C2 et le troisième contact C3 en utilisant la sous-unité d'application d'une tension 44 et en mesurant le courant résultant entre ces deux contacts C2 et C3 à l'aide de la sous-unité de mesure 46.
- [0080] La caractéristique courant – tension entre le deuxième contact C2 et le troisième contact C3 qui correspond à la caractéristique de sortie du transistor 10, est ainsi contrôlée par l'état rémanent du sous-ensemble à états rémanents 18.
- [0081] Cette caractéristique est représentée sur la [Fig.4].
- [0082] Dans un deuxième exemple de fonctionnement, la sous-unité d'application d'une tension 44 applique une tension entre le premier contact C1 et le deuxième contact C2 de manière à obtenir un état quelconque du cycle d'hystérésis. La conductivité du canal 20 peut prendre plus de deux états, et servir ainsi à coder une information analogique, non binaire, telle qu'un poids synaptique dans un réseau de neurones pour l'intelligence artificielle.
- [0083] Le transistor 10 qui vient d'être décrit est un transistor non-volatil à effet de champ à base de canal 20 de gaz bidimensionnel d'électrons à l'interface entre une couche d'oxyde et une couche réductrice 22 de type métal. C'est l'association d'une couche oxyde du sous-ensemble à états rémanents 18 avec la couche réductrice 22 qui permet de réaliser un contrôle non-volatil de la conductivité du canal 20.
- [0084] Cela permet d'éviter d'utiliser un élément ferroélectrique additionnel au-dessus de la structure, puisque la combinaison du sous-ensemble à états rémanents 18 et de la couche réductrice 22 permet de créer à la fois le gaz bidimensionnel d'électrons et les états rémanents.
- [0085] Par ailleurs, la présence d'un ensemble formé par la couche d'oxyde, le gaz bidi-

mensionnel d'électrons et la couche réductrice 22 permet, par rapport aux transistors non-volatils à effet de champ de l'état de l'art, d'optimiser la conductivité du canal 20, d'obtenir une meilleure endurance, et un contraste amélioré entre l'état passant et l'état non-passant. Les performances obtenues grâce au canal 20 en gaz bidimensionnel d'électrons, créé par utilisation d'une couche réductrice formée selon des procédés classiques de microélectronique tels que la pulvérisation cathodique, permettent de rendre le transistor 10 adapté à une exploitation industrielle.

Revendications

[Revendication 1]

Transistor (10) non-volatil à effet de champ, le transistor (10) comprenant :

- une première électrode (12) dite électrode de grille comportant un premier contact (C1),
 - une deuxième électrode (14) dite source (14), la source (14) comprenant un deuxième contact (C2),
 - une troisième électrode (16) dite drain (16), le drain (16) comportant un troisième contact (C3),
 - un canal (20) entre le drain (16) et la source (14), le canal (20) étant constitué d'un gaz bidimensionnel d'électrons,
 - un sous-ensemble à états rémanents (18), le sous-ensemble à états rémanents (18) présentant au moins deux états rémanents contrôlables électriquement, le sous-ensemble à états rémanents (18) étant en contact avec le canal (20), le sous-ensemble à états rémanents (18) comportant au moins une couche d'oxyde, et
 - une couche réductrice (22) réalisée en au moins un matériau réducteur de type métal, chaque matériau réducteur de type métal présentant une concentration atomique en éléments métalliques supérieure ou égale à 50%, ces éléments métalliques étant choisis dans les colonnes 3d, 4d, 5d, 5f de la classification périodique,
- la première électrode (12) étant en contact avec le sous-ensemble à états rémanents (18) et l'application d'une tension entre le premier contact (C1) et un contact parmi le deuxième contact (C2) et le troisième contact (C3) entraînant une modulation non-volatile de la conductivité du gaz bidimensionnel constituant le canal (20).

[Revendication 2]

Transistor non-volatil selon la revendication 1, dans lequel la couche réductrice (22) est une monocouche de matériau réducteur de type métal ou un multicouche de matériaux réducteurs de type métal, ce ou ces matériaux réducteurs présentant chacun une concentration atomique en éléments métalliques supérieure ou égale à 50%, ce ou ces éléments métalliques étant choisis dans les colonnes 3d, 4d, 5d, 5f de la classification périodique.

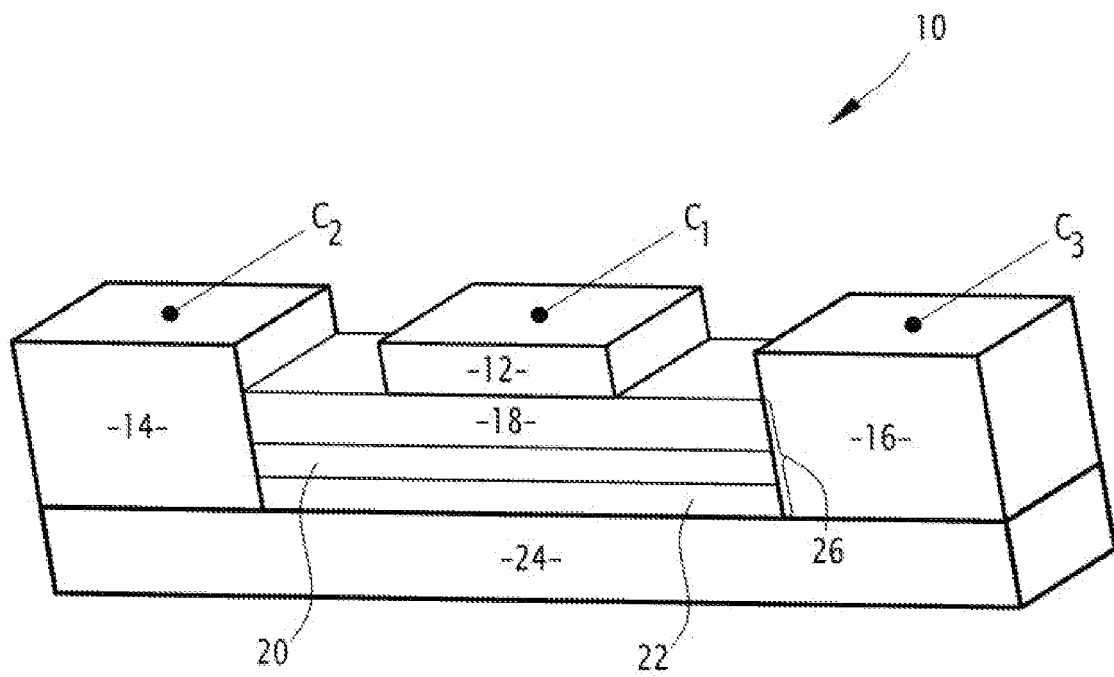
[Revendication 3]

Transistor non-volatil selon la revendication 1 ou 2, dans lequel le sous-ensemble à états rémanents (18) comprend au moins une couche ou multicouche diélectrique non-volatile à contrôle électrique, par effet ferroélectrique, par effet de charge piégée, par effet de migration d'ions ou

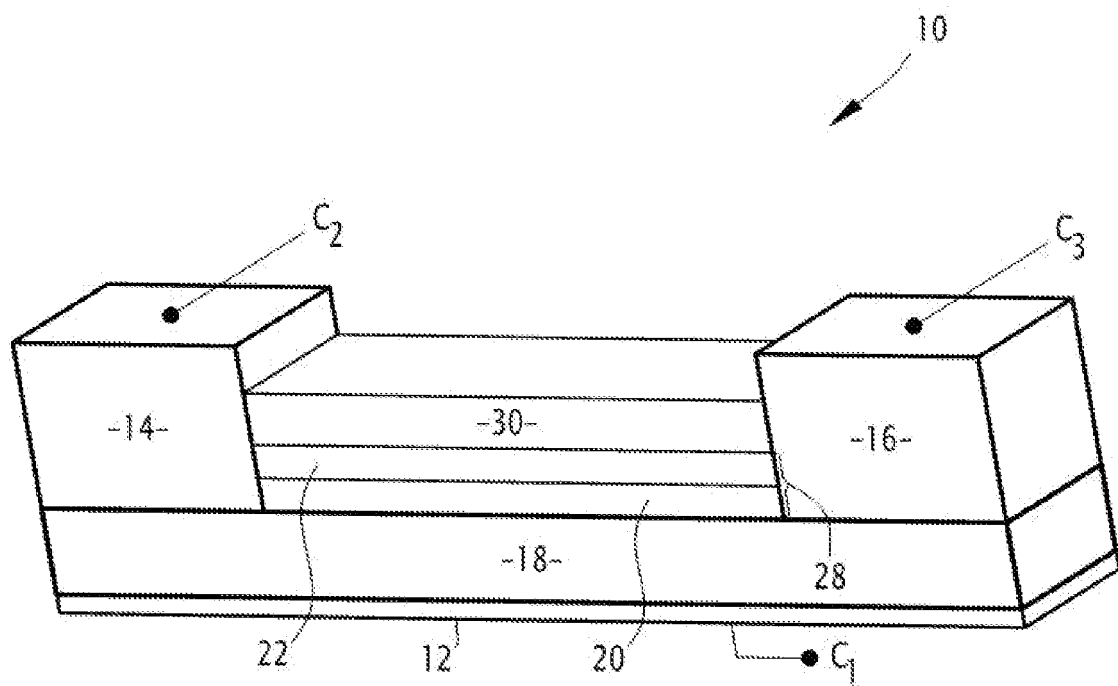
- par combinaison de plusieurs de ces effets.
- [Revendication 4] Transistor (10) non-volatil selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel dans lequel chaque matériau réducteur de type métal présente une concentration atomique en éléments métalliques supérieure ou égale à 80%.
- [Revendication 5] Transistor non-volatil selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel chaque élément métallique est choisi dans la liste constituée de l'aluminium, du tantale, de l'yttrium, du magnésium et du ruthénium.
- [Revendication 6] Transistor non-volatil selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel la couche réductrice (22) présente une épaisseur inférieure ou égale à 15 nanomètres et de préférence inférieure ou égale à 10 nanomètres.
- [Revendication 7] Transistor non-volatil selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel :
- le transistor (10) comporte un substrat (24) sur lequel repose le drain (16), la source (14) et la couche réductrice (22),
 - la couche réductrice (22), le canal (20) et le sous-ensemble à états rémanents (18) formant dans cet ordre un empilement, et
 - la première électrode (12) repose sur le sous-ensemble à états rémanents (18).
- [Revendication 8] Transistor non-volatil selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel :
- le sous-ensemble à états rémanents (18) repose sur la première électrode (12),
 - le drain (16), le canal (20) et la source (14) reposent sur le sous-ensemble à états rémanents (18), et
 - la couche réductrice (22) est disposée sur le canal (20).
- [Revendication 9] Transistor non-volatil selon la revendication 8, comportant, en outre, une couche de protection (30) sur la couche réductrice (22).
- [Revendication 10] Transistor non-volatil l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans lequel le sous-ensemble à états rémanents (18) comporte une couche choisie parmi :
- une couche d'oxyde en oxydes pérovskites,
 - une couche d'oxyde en $(\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_2$, x variant entre 0 et 1, éventuellement dopée, et
 - une couche en poly(fluorure de vinylidène).
- [Revendication 11] Transistor non-volatil selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans lequel le transistor (10) comporte une unité de lecture, l'unité de

lecture comportant une sous-unité d'application d'une tension entre le drain (16) et la source (14) et une sous-unité de mesure du courant entre le drain (16) et la source (14).

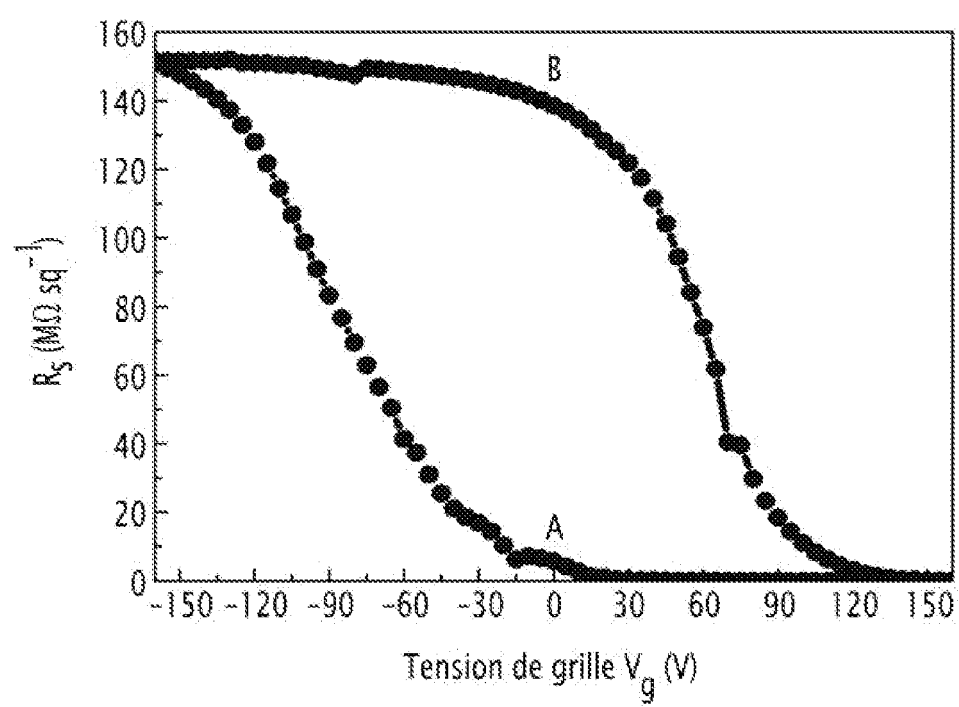
[Fig. 1]



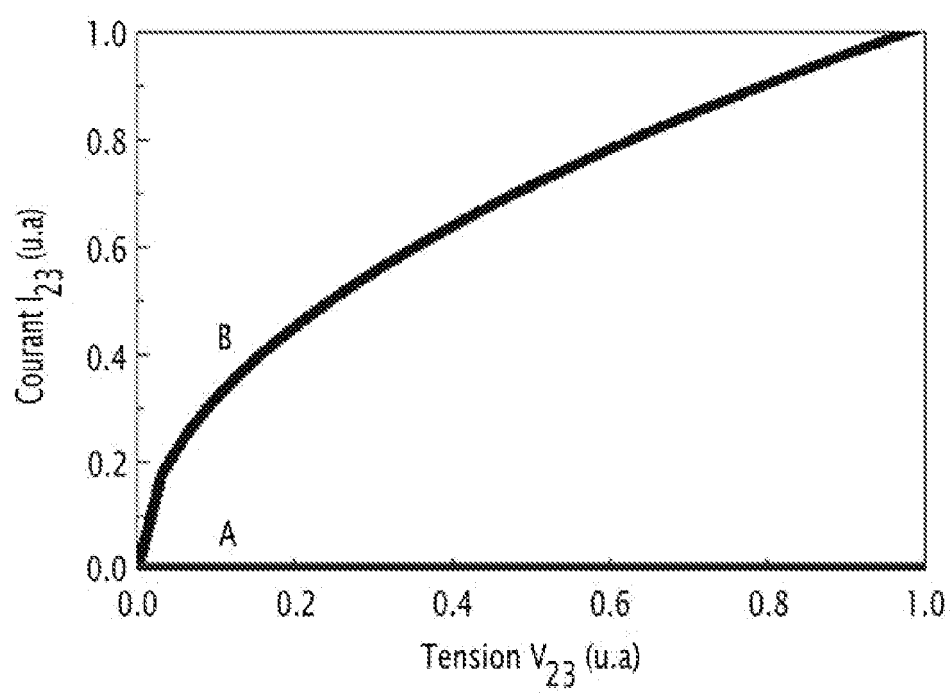
[Fig. 2]



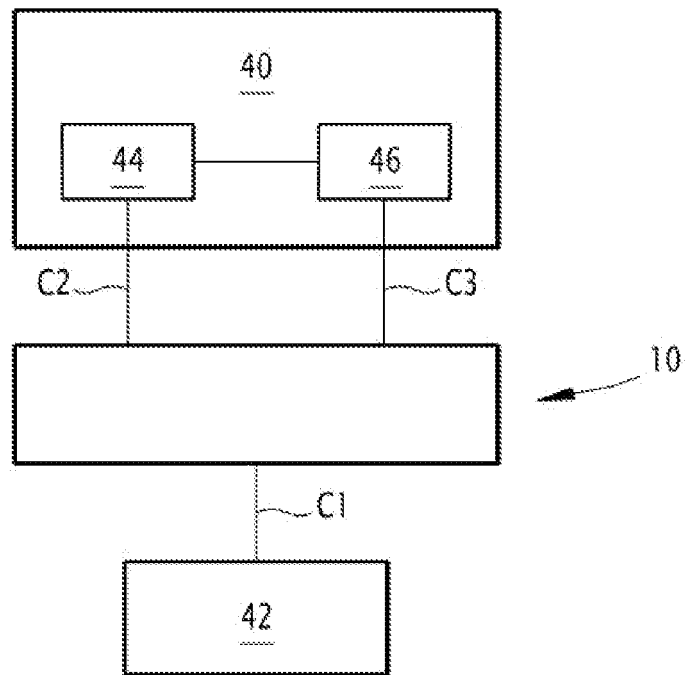
[Fig. 3]



[Fig. 4]



[Fig. 5]



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 904216

FR 2200906

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
Y	WU CHUNLEI ET AL: "Hf0.5Zr0.5O2-Based Ferroelectric Gate HEMTs With Large Threshold Voltage Tuning Range", IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, IEEE, USA, vol. 41, no. 3, 9 janvier 2020 (2020-01-09), pages 337-340, XP011774219, ISSN: 0741-3106, DOI: 10.1109/LED.2020.2965330 [extrait le 2020-02-25] * le document en entier * -----	1-11	H01L29/788
Y	JULIEN BREHIN ET AL: "A switchable two-dimensional electron gas based on ferroelectric Ca:SrTiO₃", ARXIV.ORG, CORNELL UNIVERSITY LIBRARY, 201 OLIN LIBRARY CORNELL UNIVERSITY ITHACA, NY 14853, 7 juillet 2020 (2020-07-07), XP081717382, DOI: 10.1103/PHYSREVMATERIALS.4.041002 * page 1 - page 4 * -----	1-11	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
A	NOËL PAUL ET AL: "Non-volatile electric control of spin-charge conversion in a SrTiORashba system", NATURE, NATURE PUBLISHING GROUP UK, LONDON, vol. 580, no. 7804, 1 avril 2020 (2020-04-01), pages 483-492, XP037098257, ISSN: 0028-0836, DOI: 10.1038/S41586-020-2197-9 [extrait le 2020-04-22] * abrégé * * page 483 - page 484; figures 1, 2 * * page 487 * -----	1-11	G11C H01L
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
12 septembre 2022		Nesso, Stefano	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			