

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 01.02.22.

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) : UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER Éta-
blissement public national scientifique, culturel et pro-
fessionnel — FR et CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE Établissement public
national à caractère administratif — FR.

72 Inventeur(s) : CHAUBET Christophe et RAYMOND
André.

73 Titulaire(s) : UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER Éta-
blissement public national scientifique, culturel et pro-
fessionnel, CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE Établissement public national à carac-
tère administratif.

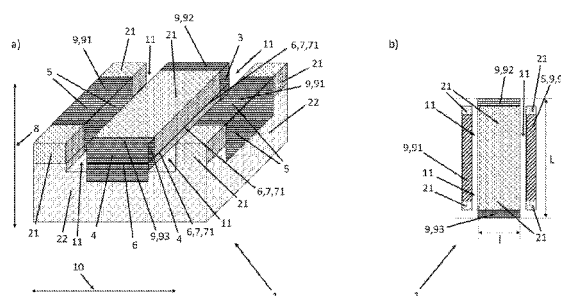
74 Mandataire(s) : IPAZ selarl.

54 Transistor à effet de champ à gaz d'électrons bidimensionnel à grilles latérales .

57 « Transistor à effet de champ à gaz d'électrons bidi-
mensionnel à grilles latérales »

Transistor à effet de champ à gaz d'électrons bidimen-
sionnel, dit TEGFET, comprenant un drain, une source et au
moins un canal compris dans une hétérostructure formée
par un empilement d'au moins deux couches de semi-
conducteur. Le TEGFET comprend au moins deux grilles la-
térales disposées de part et d'autre de l'au moins un canal
et disposées, chacune, en vis-à-vis d'un côté de l'au moins
un canal, ledit côté de l'au moins un canal comprend une
plus petite dimension dudit au moins canal, dite épaisseur
de l'au moins un canal, s'étendant selon un axe selon lequel
sont empilées les au moins deux couches de semiconduc-
teur et s'étendant perpendiculairement à la longueur de l'au
moins un canal. Le TEGFET ne comprend pas de grille po-
sitionnée en dessous ou au-dessus de l'au moins un canal
par rapport à un axe perpendiculaire à un plan, dit plan de
canal, selon lequel s'étend l'au moins un canal entre la
source et le drain, ledit plan de canal étant perpendiculaire
à l'épaisseur de l'au moins un canal.

Figure pour l'abrégi : Figure 2



Description

Titre de l'invention : Transistor à effet de champ à gaz d'électrons bidimensionnel à grilles latérales

Domaine technique

- [0001] La présente invention appartient au domaine technique des transistors à effet de champ de gaz d'électrons bidimensionnel, dits TEGFETs. Le principe de fonctionnement des transistors à effet de champ est de moduler le courant circulant entre la source et le drain en modifiant la tension appliquée entre la grille et la source du transistor. Dans le cas des TEGFETs, la modulation du courant source-drain est réalisée en modulant la densité électronique du gaz d'électrons bidimensionnels. Le gaz d'électrons bidimensionnel se trouve confiné dans un canal d'une hétérostructure.
- [0002] Les TEGFETs présentent une haute vitesse de transport des électrons, ce qui rend leur utilisation pertinente dans les dispositifs hautes fréquences. En outre, les TEGFETs sont également utilisés pour des applications hautes puissances, par exemple dans les dispositifs ou composants à base de GaN.
- [0003] L'invention se rapporte, en particulier mais de manière non limitative, aux transistors hautes fréquences. En particulier, l'invention est applicable à tous les types de TEGFETs existants et, en particulier mais de manière non limitante, au TEGFETs de type III-V et III-V-N.

Etat de la technique antérieure

- [0004] Au vu des domaines d'applications précités des TEGFETs, leur fiabilité est un critère déterminant.
- [0005] Le fonctionnement des TEGFETs de l'état de la technique consiste à dépléter le gaz d'électrons bidimensionnel sur toute la largeur du canal de sorte à modifier la densité et/ou la répartition géométrique de porteurs de charges dans le canal.
- [0006] Les TEGFETs de l'état de la technique possèdent une grille supérieure, située verticalement au-dessus du canal, par rapport au plan formé par le gaz d'électrons bidimensionnel, qui permet de contrôler le courant source-drain en modulant la densité électronique du gaz bidimensionnel au moyen d'un champ électrique normal au gaz d'électrons bidimensionnel. L'application d'un champ électrique normal au gaz d'électrons bidimensionnel a pour effet de générer une déplétion du gaz d'électrons bidimensionnel sur l'ensemble de la largeur du canal, par appauvrissement ou en enrichissement en porteurs selon le type et/ou l'architecture de transistor à effet de champ, et ainsi modifier la conductivité du canal.
- [0007] Les TEGFETs de l'état de l'art présentent plusieurs inconvénients parmi lesquels on trouve, à titre d'exemple non limitatifs, les courants de fuite de grille, les défauts

d'interfaces et la fragilité de la grille.

- [0008] Les courants de fuite de grille sont des indicateurs majeurs de l'état d'un dispositif. Ils permettent de révéler leur dégradation future. L'amélioration de la fiabilité nécessite un contrôle du courant de fuite qui est également à l'origine de bruits électroniques, « générations-recombinaisons » et bruit en $1/\text{fréquence}$ (f).
- [0009] Les défauts d'interfaces s'entendent des défauts à l'interface semiconducteur-grille et/ou des défauts à l'interface diélectrique-grille quand un diélectrique a été déposé pour réduire le courant de fuite. Ces défauts participent à des processus d'effets de piégeages tels que la dispersion de la fréquence de transconductance, l'effondrement des caractéristiques de drain en courant continu, les transitoires de grille et de drain et la limitation de la puissance micro-ondes.
- [0010] La fragilité de la grille vient, d'une part, de la fragilité de l'oxyde ou du cristal entre la grille et le gaz et, d'autre part, du fait que la grille est déposée en surface du semi-conducteur sans être diffusée. Le fait qu'elle soit déposée simplement la rend très sensible à tout choc électrostatique.
- [0011] La présente invention vise à pallier, au moins en partie, les inconvénients des dispositifs de l'état de l'art.
- [0012] Un but de l'invention est, en outre, de proposer un TEGFET :
- permettant de pallier les inconvénients des dispositifs de l'état de la technique, et/ou
 - dont les caractéristiques courant tension sont fiables et reproductibles, et/ou
 - présentant une courbe de saturation dans laquelle le courant drains-source I_{DS} est quasi constant et/ou ne dépend pas ou dépend peu de la tension drain-source V_{DS} , et/ou
 - dans lequel le courant I_{DS} varie de manière notable ou conséquente, pour une tension V_{DS} donnée, lorsque la tension de polarisation de grille V_{GS} varie, de sorte qu'il est possible de piloter le TEGFET en faisant varier la tension V_{GS} , et/ou
 - ne présentant pas ou peu de courant de fuite de grille, et/ou
 - présentant des caractéristiques fiables et reproductibles sur une gamme de températures comprises entre 300 et 1.5 Kelvins, et/ou
 - étant insensible ou peu sensible à l'environnement local et aux interférences, tels que, par exemple, les rayonnements électromagnétiques ou les rayonnements ionisants.

Présentation de l'invention

- [0013] A cet effet, il est proposé un transistor à effet de champ à gaz d'électrons bidimensionnel, dit TEGFET. Ledit TEGFET comprend un drain, une source et au moins un canal compris dans une hétérostructure formée par un empilement d'au moins deux couches de semiconducteur, de préférence au moins deux couches distinctes ou de composition différentes. L'au moins un canal relie, selon sa plus grande dimension, dite longueur de l'au moins un canal, la source et le drain.

- [0014] Ledit TEGFET comprend au moins deux grilles latérales disposées de part et d'autre de l'au moins un canal et disposées, chacune, en vis-à-vis d'un côté de l'au moins un canal, lesdits côtés de l'au moins un canal comprennent, ou s'étendent selon, une plus petite dimension dudit au moins canal, dite épaisseur de l'au moins un canal, l'épaisseur s'étendant selon un axe selon lequel sont empilées les au moins deux couches de semiconducteur et s'étendant perpendiculairement à la longueur de l'au moins un canal.
- [0015] De préférence, le TEGFET ne comprend pas de grille positionnée en dessous ou au-dessus de l'au moins un canal par rapport à un axe perpendiculaire à un plan, dit plan de canal, selon lequel s'étend l'au moins un canal entre la source et le drain, ledit plan de canal étant perpendiculaire à l'épaisseur de l'au moins un canal et/ou étant perpendiculaire à l'axe d'empilement des au moins deux couches de semiconducteur et/ou étant parallèle à la longueur de l'au moins un canal.
- [0016] De préférence, il est entendu par « côté de l'au moins un canal » une face ou une surface ou une interface. De préférence, le côté de l'au moins un canal s'étend ou comprend l'épaisseur et la longueur de l'au moins un canal.
- [0017] De préférence, au moins une des grilles latérales est en vis-à-vis d'un côté de l'au moins un canal qui est opposé au côté en vis-à-vis duquel au moins une autre des grilles latérales est en vis-à-vis.
- [0018] De préférence, la source et le drain sont compris dans ou appartiennent à une même couche du TEGFET. De préférence, la couche comprenant le drain et la source comprend, en outre, l'au moins un canal.
- [0019] De préférence, la conductivité de l'au moins un canal et/ou la densité d'électrons du gaz bidimensionnel est modulée et/ou contrôlée, de préférence uniquement, par l'au moins deux grilles latérales.
- [0020] De préférence, les au moins deux grilles latérales sont agencées pour moduler et/ou contrôler la conductivité de l'au moins un canal et/ou la densité d'électrons du gaz bidimensionnel.
- [0021] De préférence, le TEGFET ne comprend pas de grille positionnée en dessous ou au-dessus du canal pour moduler et/ou contrôler la conductivité de l'au moins un canal et/ou la densité d'électrons du gaz bidimensionnel.
- [0022] De préférence, le gaz bidimensionnel d'électrons est compris et confiné dans l'au moins un canal. De préférence, le plan de canal est parallèle au plan selon lequel s'étend le gaz bidimensionnel.
- [0023] De préférence, le gaz d'électrons bidimensionnel s'étend entre une interface, s'étendant selon un plan parallèle à l'axe d'empilement, de préférence perpendiculaire au plan de canal, entre la source et l'empilement des au moins deux couches de semiconducteur et une interface, s'étendant selon un plan parallèle à l'axe d'empilement, de

préférence perpendiculaire au plan de canal, entre le drain et l'empilement des au moins deux couches de semiconducteur. De préférence, le gaz d'électrons bidimensionnel ne s'étend pas dans la source ni dans le drain.

- [0024] De préférence, le canal s'étend, jusqu'à la source et au drain.
- [0025] De préférence, la longueur de l'au moins un canal correspond à la plus grande dimension de l'au moins un canal et/ou à la plus grande distance séparant deux extrémités, de préférence opposées, de l'au moins un canal.
- [0026] Il peut être entendu par plan de canal un plan perpendiculaire à l'épaisseur de l'au moins un canal.
- [0027] De préférence, l'épaisseur de l'au moins un canal présente une dimension inférieure à la longueur et à la largeur de l'au moins un canal. L'épaisseur de l'au moins un canal peut être définie comme la plus petite dimension de l'au moins un canal et/ou comme la plus petite distance séparant deux faces, de préférence opposées, de l'au moins un canal.
- [0028] Le TEGFET peut comprendre un nombre pair de grilles latérales. Le TEGFET peut comprendre plus de deux grilles latérales. Le TEGFET peut comprendre une succession de grilles latérales adjacentes, s'étendant selon l'axe reliant la source au drain, disposées de part et d'autre de l'au moins un canal. Deux grilles latérales adjacentes de la succession de grilles latérales peuvent être séparées par une tranchée ou un évidement. Les grilles latérales, de la succession de grilles latérales, peuvent être alignées, deux à deux, selon un axe perpendiculaire à l'axe reliant la source au drain et perpendiculaire à l'axe d'empilement.
- [0029] De préférence, le l'au moins un canal comprend deux côtés opposés, de préférence encore deux côtés parallèles.
- [0030] De préférence, l'au moins un canal présente une largeur s'étendant selon un axe reliant les deux côtés de l'au moins au canal.
- [0031] De préférence, la largeur de l'au moins un canal s'étendant selon un axe compris dans le plan de canal et/ou selon un axe qui est perpendiculaire à l'axe reliant le drain à la source et/ou selon un axe perpendiculaire à la longueur de l'au moins un canal et/ou selon un axe perpendiculaire à l'épaisseur de l'au moins un canal.
- [0032] De préférence, la largeur de l'au moins un canal présente une dimension inférieure à la longueur de l'au moins un canal.
- [0033] De préférence, le TEGFET comprend deux grilles latérales distinctes l'une de l'autre. De préférence encore, chacune des deux grilles latérales est indépendante, en particulier de l'autre des deux grilles latérales. De manière davantage préférée, les deux grilles latérales n'ont aucune portion commune.
- [0034] De préférence, les deux grilles latérales sont symétriques. De préférence, les deux grilles latérales sont symétriques par rapport à l'au moins un canal.

- [0035] De préférence, les deux grilles latérales sont réalisées ou comprennent ou sont constituées d'un matériau semiconducteur. De préférence, le matériau semiconducteur comprend des atomes métalliques, de préférence des atomes métalliques diffusés. De préférence, le matériau semiconducteur, ou la portion ou partie du matériau semiconducteur, comprenant les atomes métalliques diffusés constitue un contact ohmique.
- [0036] De préférence, les deux grilles latérales et le canal sont des éléments ou composants ou structures ou couches ou matériaux physiquement et/ou spatialement distincts.
- [0037] De préférence, les deux grilles latérales sont disposées, latéralement, de part et d'autre de l'au moins un canal par rapport à l'axe reliant la source et le drain.
- [0038] De préférence, les deux grilles latérales s'étendent principalement selon un plan selon lequel s'étend principalement l'au moins un canal.
- [0039] Le TEGFET peut comprendre un unique canal.
- [0040] De préférence, le TEGFET peut comprendre deux canaux, de préférence encore trois canaux, de manière préférée quatre canaux et de manière davantage préférée cinq canaux. De préférence, les plans de canal des canaux du TEGFET sont parallèles entre eux. De préférence, les canaux du TEGFET forment un empilement selon l'axe d'empilement des au moins deux couches de semiconducteur.
- [0041] De préférence, la face d'une des deux grilles latérales située du côté de l'au moins un canal est parallèle à la face de l'autre des deux grilles latérales située du côté de l'au moins un canal.
- [0042] De préférence, la largeur de la face de chacune des grilles latérales située du côté de l'au moins un canal correspond ou est égale ou, est de préférence est supérieure, à l'épaisseur de l'au moins un canal.
- [0043] La longueur de la face, située du côté de l'au moins un canal, de chacune des grilles latérales peut être définie comme la plus grande dimension de ladite face et/ou comme la plus grande distance séparant deux extrémités, de préférence opposées, de ladite face.
- [0044] De préférence, la largeur de la face, située du côté de l'au moins un canal, de chacune des grilles latérales présente une dimension inférieure à la longueur de ladite face. La largeur de la face, située du côté de l'au moins un canal, de chacune des grilles latérales peut être définie comme la plus petite dimension de ladite face et/ou comme la plus petite distance séparant deux extrémités, de préférence opposées, de ladite face.
- [0045] De préférence, aucune des grilles latérales, parmi les au moins deux grilles latérales, n'est en contact, ni ne présente de partie commune ou d'interface commune avec le drain et la source.
- [0046] Une plus grande dimension des au moins deux grilles latérales peut s'étendre principalement perpendiculairement ou parallèlement à l'axe reliant la grille et le drain.
- [0047] De préférence, la conductivité de l'au moins un canal est modulée et/ou contrôlée sur

une portion ou partie de l'au moins un canal. De préférence, la conductivité de l'au moins un canal est modulée et/ou contrôlée sur une tranche de l'au moins un canal. De préférence encore, la tranche de l'au moins un canal dans laquelle la conductivité est modulée et/ou contrôlée correspond à une portion ou partie de l'au moins un canal s'étendant sur une partie seulement de la largeur et/ou sur toute la longueur et/ou sur toute l'épaisseur de l'au moins un canal.

- [0048] De préférence, la tranche de l'au moins un canal dans laquelle la conductivité de l'au moins un canal est modulée et/ou contrôlée correspond à une portion ou partie de l'au moins un canal s'étendant sur une partie ou portion de la longueur de l'au moins un canal. Il peut être entendu par « une partie de la longueur de l'au moins un canal », une distance, selon l'axe reliant la source et le drain ou selon l'axe de la longueur de l'au moins un canal, inférieure ou égale à la longueur de l'au moins un canal. De manière davantage préférée, la distance ou dimension, selon l'axe reliant la source et le drain, de la tranche de l'au moins un canal dans laquelle la conductivité du canal est modulée et/ou contrôlée est égale à la longueur de la face d'une grille latérale, parmi les au moins deux grilles latérales, située du côté de l'au moins un canal ou à la longueur de la face de chacune des grilles latérales située du côté de l'au moins un canal.
- [0049] La portion ou la partie de l'au moins un canal dans laquelle la conductivité est modulée et/ou contrôlée peut être définie comme la portion ou la partie du TEGFET permettant de commander, de manière contrôlée, le blocage et/ou la circulation, de préférence contrôlée, de porteurs entre le drain et la source.
- [0050] La largeur de l'au moins un canal peut varier le long de l'axe reliant la source au drain.
- [0051] De préférence, le terme latéral ou latéralement définit ou désigne une position ou un emplacement relativement à l'axe reliant le drain à la source.
- [0052] De préférence, il peut être entendu par axe latéral un axe qui est compris dans le plan de canal et qui est perpendiculaire à l'axe reliant la source et le drain et qui est perpendiculaire à l'épaisseur de l'au moins un canal.
- [0053] De préférence, les au moins deux grilles latérales s'étendent, selon l'axe d'empilement des au moins deux couches de semiconducteur ou selon un axe perpendiculaire au plan de canal, de part et d'autre de chaque canal, parmi l'au moins un canal. De préférence, les au moins deux grilles latérales s'étendent, selon l'axe d'empilement des au moins deux couches de semiconducteur ou selon un axe perpendiculaire au plan de canal, depuis une surface externe du TEGFET vers l'au moins un canal. De préférence, les au moins deux grilles latérales s'étendent, selon l'axe d'empilement des au moins deux couches de semiconducteur et selon la direction reliant la surface supérieure externe des au moins deux grilles latérales à l'au moins un canal, au-delà de chaque canal, parmi l'au moins un canal.

- [0054] De préférence, aucune des grilles latérales n'est en contact ni ne présente de partie commune ou d'interface commune avec l'au moins un canal.
- [0055] De préférence, le TEGFET est agencé, de préférence encore les au moins deux grilles latérales sont agencées pour moduler et/ou modifier et/ou faire varier le potentiel dans l'au moins un canal selon un axe, dit latéral, compris dans le plan de canal et perpendiculaire à l'axe reliant la source et le drain. De préférence, le TEGFET est agencé pour, de préférence encore les au moins deux grilles latérales sont agencées pour moduler et/ou modifier et/ou faire varier le potentiel dans l'au moins un canal selon l'axe latéral par polarisation des au moins deux grilles latérales par rapport à la source.
- [0056] De préférence, la modulation et/ou la modification et/ou la variation latérale du potentiel dans l'au moins un canal a pour effet de modifier, de préférence sur une ou plusieurs portions ou parties de la largeur de l'au moins un canal, le potentiel et/ou de créer un gradient de potentiel latéralement dans l'au moins un canal.
- [0057] De préférence, la modulation et/ou la modification et/ou la variation latérale du potentiel dans l'au moins un canal a pour effet de moduler ou modifier ou faire varier dans l'au moins un canal, selon l'axe latéral, la densité d'électrons du gaz bidimensionnel et/ou la densité de courant drain-source et/ou le courant de saturation.
- [0058] De préférence, comme pour les FETs de l'état de l'art, le TEGFET selon l'invention est agencé pour que le potentiel dans l'au moins un canal varie le long de l'axe du canal.
- [0059] En outre, de préférence, selon l'invention, le TEGFET, de préférence les au moins deux grilles latérales, sont agencés pour que le potentiel soit maximum au centre de l'au moins un canal, lorsque les deux grilles sont à un même potentiel par rapport à la source. De préférence, selon l'invention, le TEGFET, de préférence les au moins deux grilles latérales, sont agencés pour que le potentiel soit nul sur un ou sur chacun des deux côtés de l'au moins un canal, lorsque l'une ou les deux grilles sont au même potentiel que la source.
- [0060] De préférence, le TEGFET comprend un diélectrique disposé entre chacune des grilles latérales, parmi les au moins deux grilles latérales, et l'au moins un canal ou séparant chacune des grilles latérales de l'au moins un canal.
- [0061] De préférence, il est entendu par diélectrique un corps ou un milieu présentant des propriétés diélectriques. L'effet du diélectrique est d'isoler les grilles latérales de l'au moins un canal.
- [0062] De préférence encore, l'absence de contact ou de partie commune ou d'interface commune entre l'au moins un grille latérale et l'au moins un canal, de préférence encore le diélectrique disposé entre chacune des deux grilles latérales et l'au moins un canal, contribue et/ou a pour effet et/ou permet de moduler et/ou modifier et/ou faire varier le potentiel dans l'au moins un canal selon l'axe latéral.

- [0063] De préférence, le TEGFET comprend une interface entre l'au moins un canal et le diélectrique qui est en vis-à-vis ou en regard ou successive ou consécutive, de préférence directement consécutive, d'une interface entre le diélectrique et une, plusieurs ou, de préférence chacune, des grilles latérales parmi les au moins deux grilles latérales.
- [0064] De préférence, l'interface entre l'au moins un canal et le diélectrique et, respectivement, l'interface entre l'au moins un canal et une grille latérale considérée parmi les au moins deux grilles latérales est une paroi ou une face ou un côté ou une surface de l'au moins un canal et, respectivement, une paroi ou une face ou un côté ou une surface de la grille latérale considérée.
- [0065] L'interface entre l'au moins un canal et le diélectrique et, respectivement, l'interface entre l'au moins un canal et une grille latérale considérée parmi les au moins deux grilles latérales peut être une paroi commune ou une face commune ou un côté commun ou une surface commune entre l'au moins un canal et le diélectrique et, respectivement, entre l'au moins un canal et la grille latérale considérée.
- [0066] De préférence, le diélectrique est agencé sous forme d'une tranchée ou d'un évidement.
- [0067] De préférence, le diélectrique est constitué par un évidement.
- [0068] De préférence, l'évidement constitue un volume s'étendant entre une grille latérale considérée parmi les au moins deux grilles latérales et l'au moins un canal.
- [0069] De préférence, l'évidement est délimité latéralement, selon un axe parallèle à la largeur de l'au moins un canal, par une face ou surface de l'au moins un canal située en vis-à-vis ou en regard de la face d'une grille latérale considérée parmi les au moins deux grilles latérales et la face, située du côté de l'au moins un canal, de la grille latérale considérée. Dans ce cas, de préférence, l'interface entre l'au moins un canal et le diélectrique est formée par la face de l'au moins un canal en vis-à-vis de la face de la grille latérale considérée. De préférence encore, dans ce cas, l'interface entre le diélectrique et la grille latérale considérée est formée par la face, située du côté de l'au moins un canal, de la grille latérale considérée.
- [0070] De préférence, l'évidement comprend ou contient un gaz.
- [0071] Autrement dit, le diélectrique peut être un gaz.
- [0072] Le gaz contenu ou compris dans l'évidement peut être de l'air.
- [0073] De préférence, l'évidement ne comprend pas ou n'est pas constituée ou ne contient pas de matière solide.
- [0074] De préférence, les au moins deux grilles latérales, de préférence encore chacune des grilles latérales, comprend et/ou est constituée et/ou est formée et/ou sont composées d'un ou de plusieurs matériaux semiconducteurs ou d'une couche d'un ou de plusieurs matériaux semiconducteurs.
- [0075] De préférence, les au moins deux grilles latérales, de préférence encore chacune des

grilles latérales, comprend et/ou est constituée et/ou est formée et/ou est composée de matériaux semiconducteurs ou d'un empilement de couches de matériau semi-conducteur.

- [0076] De préférence, le ou les matériaux semiconducteur composant les au moins deux grilles latérales comprend des atomes de métal diffusés dans le ou les matériaux semi-conducteurs, de préférence comprend des atomes de métal ayant diffusés dans le ou les matériaux semiconducteurs.
- [0077] De préférence, le drain, la source et les au moins deux grilles latérales comprennent, chacun, une couche de métal formant un contact électrique distinct. De préférence, la couche de métal du drain, la couche de métal de la source et la couche de métal des au moins deux grilles latérales sont respectivement situées sur une surface supérieure externe du drain, de la source et des au moins deux grilles latérales. De préférence, les couches de métal et les surfaces supérieures externes du drain, de la source et des au moins deux grilles latérales constituent, au moins en partie, de préférence en partie seulement, une surface supérieure externe du TEGFET.
- [0078] De préférence, la couche de métal présente une épaisseur de 10 à 500 nm. De préférence, la couche de métal comprend et/ou est composée d'un eutectique. De préférence, l'eutectique comprend et/ou est composé d'or, de germanium et de nickel.
- [0079] De préférence, le TEGFET selon l'invention, est agencé et/ou apte à moduler et/ou modifier et/ou faire varier le potentiel de l'au moins un canal le long de l'axe latéral. De préférence, le TEGFET selon l'invention, est agencé et/ou apte à moduler et/ou modifier et/ou faire varier la densité d'électrons du gaz bidimensionnel et/ou de la densité de courant du gaz d'électron bidimensionnel le long de l'axe latéral, de préférence encore sur une partie, de préférence sur une partie seulement, de la largeur de l'au moins un canal. De préférence, le TEGFET selon l'invention, n'est pas agencé ni apte à appliquer un potentiel constant sur toute la largeur de l'au moins un canal. De préférence, le TEGFET selon l'invention, n'est pas agencé ni apte à faire varier la densité d'électrons du gaz bidimensionnel et/ou de la densité de courant, de manière uniforme, sur toute la largeur de l'au moins un canal.
- [0080] De préférence, les au moins deux grilles latérales, de préférence encore chacune des grilles latérales, est agencée pour moduler et/ou modifier et/ou faire varier le potentiel de l'au moins un canal le long de l'axe latéral. De préférence, les au moins deux grilles latérales, de préférence encore chacune des grilles latérales, sont agencées et/ou aptes à moduler et/ou modifier et/ou faire varier la densité d'électrons du gaz d'électron bidimensionnel, de préférence de manière non uniforme, sur la largeur de l'au moins un canal. De préférence, le TEGFET selon l'invention, n'est pas agencé ni apte à appliquer un potentiel constant sur toute la largeur de l'au moins un canal. De préférence, les au moins deux grilles latérales, de préférence encore chacune des grilles

latérales, n'est pas agencée ni apte à générer une déplétion du gaz d'électron bidimensionnel et/ou la densité du courant, de manière uniforme, sur toute la largeur de l'au moins un canal.

- [0081] De préférence, le TEGFET selon l'invention, de préférence les deux grilles latérales, de préférence encore l'agencement des deux grilles latérales, n'est pas agencé et/ou n'est pas apte à transformer le gaz d'électrons bidimensionnel en gaz d'électrons monodimensionnel.
- [0082] De préférence, une des grilles latérales peut être électriquement connectée à la source.
- [0083] De préférence, la connexion électrique d'une des grilles latérales à la source permet que la grille latérale connectée à la source présente le même potentiel que celui de la source.
- [0084] Selon l'invention, il est également proposé un procédé de modulation de la conductivité d'au moins un canal d'un transistor à effet de champ à gaz d'électron bidimensionnel, dit TEGFET. Le procédé comprend l'étape consistant à appliquer une différence de potentiel entre une source et un drain du TEGFET. Le procédé comprend, en outre, l'étape consistant à appliquer :
 - une même différence de potentiel entre au moins une grilles latérales du TEGFET, par exemple une première grille latérale, parmi au moins deux grilles latérales disposées latéralement de part et d'autre de l'au moins un canal du TEGFET, et la source du TEGFET, et/ou
 - un même potentiel sur une ou chacune des grilles latérales et sur la source du TEGFET, et/ou
 - une différence de potentiel entre au moins une des grilles latérales du TEGFET, par exemple une seconde ou deuxième grille latérale, disposées latéralement de part et d'autre de l'au moins un canal du TEGFET, ou entre chacune des grilles latérales du TEGFET, et la source du TEGFET.
- [0085] L'au moins un canal relie, selon une plus grande dimension de l'au moins un canal, dite longueur de l'au moins un canal, la source et le drain du TEGFET.
- [0086] Le TEGFET ne comprend pas de grille positionnée en dessous ou au-dessus de l'au moins un canal par rapport à un axe perpendiculaire à un plan, dit plan de canal, selon lequel s'étend l'au moins un canal entre la source et le drain. Le plan de canal est perpendiculaire à une plus petite dimension de l'au moins canal, dite épaisseur de l'au moins un canal, s'étendant :
 - selon un axe selon lequel sont empilées au moins deux couches de semiconducteur formant une hétérostructure dans laquelle est comprise l'au moins un canal, et
 - perpendiculairement à la longueur de l'au moins un canal.
- [0087] L'étape consistant à appliquer le même potentiel ou une différence de potentiel entre

les au moins deux grilles latérales et la source et/ou à appliquer un même potentiel ou une différence de potentiel entre au moins une grille latérale et au moins une autre grille latérale peut consister à moduler et/ou modifier et/ou faire varier le potentiel d'au moins une grille latérale par rapport au potentiel de la source et/ou du potentiel d'au moins une grille latérale par rapport au potentiel d'au moins une autre grille latérale.

[0088] De préférence, le procédé de modulation de la conductivité d'au moins un canal d'un TEGFET ne comprend pas d'étape consistant à moduler et/ou modifier et/ou faire varier le potentiel dans l'au moins un canal et/ou la densité d'électron du gaz bidimensionnel et/ou de la densité de courant, de manière uniforme, sur l'ensemble de la largeur de l'au moins un canal.

[0089] De préférence, le procédé de modulation de la conductivité d'au moins un canal d'un TEGFET ne comprend pas d'étape consistant à appliquer un potentiel constant sur toute la largeur de l'au moins un canal.

[0090] De préférence, le procédé de modulation de la conductivité d'au moins un canal comprend l'étape consistant à moduler et/ou modifier et/ou faire varier le potentiel et/ou la conductivité dans l'au moins un canal selon un axe, dit latéral, compris dans le plan de canal et perpendiculaire à l'axe reliant la source et le drain, par application d'une même différence de potentiel entre au moins une des grilles latérales et la source et/ou par application du même potentiel sur une ou chacune des grilles latérales et sur la source et/ou par application d'une différence de potentiel entre au moins une des grilles latérales, ou entre chacune des grilles latérales, et la source.

[0091] L'étape consistant à moduler et/ou modifier et/ou faire varier, le long de l'axe latéral, le potentiel électrostatique dans l'au moins un canal peut comprendre, en outre, l'étape consistant à moduler et/ou modifier et/ou faire varier le potentiel des au moins deux grilles latérales par rapport au potentiel de la source et/ou le potentiel d'au moins une grille latérale par rapport au potentiel d'au moins une autre grille latérale.

[0092] L'étape consistant à moduler et/ou modifier et/ou faire varier le potentiel des au moins deux grilles latérales par rapport au potentiel de la source et/ou le potentiel d'au moins une grille latérale par rapport au potentiel d'au moins une autre grille latérale peut entraîner ou avoir pour effet de moduler et/ou modifier et/ou faire varier le potentiel électrostatique dans l'au moins un canal selon l'axe latéral.

[0093] De préférence, l'étape consistant à moduler et/ou modifier et/ou à faire varier, spatialement selon l'axe latéral, le potentiel électrostatique dans l'au moins un canal, a pour effet de moduler et/ou modifier et/ou faire varier le courant drain-source et/ou le courant de saturation du TEGFET.

[0094] Le procédé de modulation de la conductivité d'au moins un canal peut comprendre l'étape consistant à moduler et/ou modifier et/ou faire varier le potentiel dans l'au moins un canal et/ou la conductivité du gaz d'électron bidimensionnel, de manière non

uniforme, selon la largeur de l'au moins un canal, de préférence sur seulement une partie d'une largeur de l'au moins un canal, et/ou la largeur de l'au moins un canal s'étend selon un axe perpendiculaire à la longueur de l'au moins un canal et perpendiculaire à l'épaisseur de l'au moins un canal, par application d'une même différence de potentiel entre au moins une grille latérale et la source et/ou par application du même potentiel sur une ou chacune des grilles latérales et sur la source et/ou par application d'une différence de potentiel entre au moins une des grilles latérales, ou entre chacune des grilles latérales, et la source.

- [0095] L'étape consistant à moduler et/ou modifier et/ou faire varier la densité d'électron du gaz bidimensionnel sur seulement une partie d'une largeur de l'au moins un canal peut comprendre, en outre, l'étape consistant à moduler et/ou modifier et/ou faire varier le potentiel des au moins deux grilles latérales par rapport au potentiel de la source et/ou le potentiel d'au moins une grille latérale par rapport au potentiel d'au moins une autre grille latérale.
- [0096] L'étape consistant à moduler et/ou modifier et/ou faire varier le potentiel des au moins deux grilles latérales par rapport au potentiel de la source et/ou le potentiel d'au moins une grille latérale par rapport au potentiel d'au moins une autre grille latérale peut entraîner ou avoir pour effet de moduler et/ou modifier et/ou faire varier la densité d'électron du gaz bidimensionnel sur seulement une partie de la largeur de l'au moins un canal.
- [0097] De préférence, le procédé de modulation de la conductivité d'au moins un canal ne comprend pas d'étape consistant à transformer le gaz d'électrons bidimensionnel en gaz d'électrons monodimensionnel.
- [0098] Le procédé de modulation de la conductivité d'un canal d'un TEGFET selon l'invention est, de préférence, mis en œuvre par le TEGFET selon l'invention. De préférence, le TEGFET selon l'invention est particulièrement adapté, de préférence encore spécialement conçu, pour mettre en œuvre le procédé selon l'invention. De préférence, le procédé selon l'invention est particulièrement adapté, de préférence encore spécialement conçu, pour être mis en œuvre par le TEGFET selon l'invention. Ainsi, toute caractéristique du procédé de modulation de la conductivité d'un canal d'un TEGFET selon l'invention peut être intégrée dans le TEGFET selon l'invention et inversement.
- [0099] Selon l'invention, il est également proposé un procédé de fabrication d'un TEGFET, de préférence du TEGFET selon l'invention. Le procédé de fabrication comprend une unique étape de recuit pour former, simultanément en une même étape, des contacts ohmiques distincts entre :
- une première couche de métal, destinée à former un contact électrique, et un drain du TEGFET, et

- une deuxième couche de métal, destinée à former un contact électrique, et une source du TEGFET, et
- une troisième couche de métal, destinée à former un contact électrique, et au moins deux grilles latérales du TEGFET, disposées latéralement de part et d'autre d'au moins un canal du TEGFET.

- [0100] De préférence, les première, deuxième et troisième couches de métal sont des couches externes supérieures. De préférence, les première, deuxième et troisième couches de métal sont disposées sur une couche supérieure d'un empilement d'au moins deux couches de matériaux semiconducteurs, formant une hétérostructure dans laquelle est comprise l'au moins un canal, destinées à former le drain, la source et les au moins deux grilles latérales.
- [0101] De préférence, l'unique étape de recuit du procédé selon l'invention consiste, en outre, à former, simultanément en une même étape, le drain, la source et les au moins deux grilles latérales par diffusion d'atomes de métal, de préférence selon un axe d'empilement des au moins deux couches de matériaux semiconducteurs :
- de la première couche de métal dans l'empilement d'au moins deux couches de matériaux semiconducteurs, et
 - de la deuxième couche de métal dans l'empilement d'au moins deux couches de matériaux semiconducteurs, et
 - de la troisième couche de métal, dans l'empilement d'au moins deux couches de matériaux semiconducteurs.
- [0102] L'étape de recuit peut être définie comme une unique étape consistant à former, simultanément et en une même étape, les contacts ohmiques.
- [0103] De préférence, les première, deuxième et troisième couches de métal sont des couches distinctes et indépendantes.
- [0104] De préférence, les atomes de métal des couches de métal diffusent à l'intérieur de l'empilement d'au moins deux couches de matériaux semiconducteurs formant le drain, la source et, en particulier, les au moins deux grilles latérales d'une distance supérieure à 50 nm, de préférence à 100 nm, de préférence encore à 150 nm, de manière davantage préférée à 200 nm, de manière encore davantage préférée à 250 nm et/ou d'une distance inférieure à 400 nm, de préférence encore à 350 nm et de manière davantage préférée à 300 nm. De préférence, les atomes de métal des couches de métal diffusent depuis une surface externe supérieure du drain, de la source et, en particulier, de chacune des au moins deux grilles latérales et selon un axe d'empilement des au moins deux couches de semiconducteur.
- [0105] De préférence, les atomes de métal des couches de métal diffusent, depuis la surface externe supérieure du drain, de la source et, en particulier des au moins deux grilles latérales, à l'intérieur de l'empilement d'au moins deux couches de matériaux semi-

conducteurs d'une distance au moins égale ou supérieure à une distance séparant :

- la surface externe supérieure de la couche supérieure de l'empilement d'au moins deux couches de semiconducteur, et
- le canal.

[0106] De préférence, la distance séparant la surface externe supérieure de la couche supérieure de l'empilement d'au moins deux couches de semiconducteur et le canal est parallèle à l'axe d'empilement et/ou perpendiculaire à un plan, dit plan de canal, selon lequel s'étend l'au moins un canal entre la source et le drain.

[0107] Le TEGFET selon l'invention est, de préférence, mis en œuvre par le procédé de fabrication selon l'invention. De préférence, le procédé de fabrication selon l'invention est particulièrement adapté, de préférence encore spécialement conçu, pour mettre en œuvre le TEGFET selon l'invention. Ainsi, toute caractéristique du procédé de fabrication selon l'invention peut être intégrée dans le TEGFET selon l'invention et inversement.

Description des figures

[0108] D'autres avantages et particularités de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée de mises en œuvre et de modes de réalisation nullement limitatifs, et des dessins annexés suivants :

[0109] [Fig.1] la FIGURE 1a) est une représentation schématique en vue de biais d'un TEGFET de l'état de l'art et la FIGURE 1b) est une représentation schématique en vue de dessus d'un TEGFET de l'état de l'art,

[0110] [Fig.2] la FIGURE 2a) est une représentation schématique en vue de biais d'un mode de réalisation d'un TEGFET selon l'invention et la FIGURE 2b) est une représentation schématique en vue de dessus du mode de réalisation du TEGFET selon l'invention illustré sur la FIGURE 2a),

[0111] [Fig.3] les FIGURES 3a) et 3b) sont des représentations schématiques en vue de côté de deux modes de réalisation d'un TEGFET selon l'invention,

[0112] [Fig.4] la [Fig.4] est une représentation schématique en vue de côté d'un mode de réalisation d'un TEGFET à multiples canaux selon l'invention,

[0113] [Fig.5] la [Fig.5] est une représentation schématique en vue de dessus d'un mode de réalisation d'un TEGFET dans lequel une grille latérale est électriquement connectée à la source,

[0114] [Fig.6] la FIGURE 6a) est une représentation schématique en vue de biais du canal d'un TEGFET de l'état de l'art en l'absence de polarisation de la grille supérieure, la FIGURE 6b) est une représentation schématique en vue de biais du canal d'un TEGFET de l'état de l'art en présence d'une polarisation de la grille supérieure et la FIGURE 6c) est un graphique illustrant l'évolution du potentiel drain-source dans le

canal selon l'axe latéral d'un TEGFET de l'état de l'art en présence d'une polarisation de la grille supérieure,

- [0115] [Fig.7] la [Fig.7] la FIGURE 7a) est une représentation schématique en vue de biais du canal d'un TEGFET selon l'invention en l'absence de polarisation de la ou des grilles latérales, la FIGURE 7b) est une représentation schématique en vue de biais du canal d'un TEGFET selon l'invention en présence d'une polarisation de la ou des grilles latérales et la FIGURE 7c) est un graphique illustrant l'évolution du potentiel drain-source dans le canal selon l'axe latéral d'un TEGFET selon l'invention en présence d'une polarisation de la ou des grilles supérieures,
- [0116] [Fig.8] les FIGURES 8a) et 8b) sont des représentations schématiques en vue de biais d'un TEGFET selon l'invention, respectivement, avant l'étape de recuit et après l'étape de recuit,
- [0117] [Fig.9] les FIGURES 9a) et 9b) sont des représentations schématiques en vue de dessus d'un TEGFET selon l'invention présentant deux géométries de canal différentes,
- [0118] [Fig.10] la FIGURE 10a) est un graphique illustrant l'évolution du courant drain-source en fonction de la tension drain-source pour différentes tensions grilles-source à une température de 300 K du TEGFET illustré sur la FIGURE 9a), la FIGURE 10b) est un graphique illustrant l'évolution du potentiel dans le canal selon l'axe latéral à l'extrémité du canal située du côté de la source en fonction de la tension drain-source pour une température de 300 K du TEGFET illustré sur la FIGURE 9b) et la FIGURE 10c) est un graphique illustrant l'évolution du potentiel dans le canal selon l'axe latéral à l'extrémité du canal située du côté du drain en fonction de la tension drain-source pour une température de 300 K du TEGFET illustré sur la FIGURE 9b),
- [0119] [Fig.11] la [Fig.11] est un graphique illustrant l'évolution du courant drain-source en fonction de la tension drain-source pour différentes tensions grilles-source à une température de 300 K du TEGFET illustré sur la FIGURE 9b) comprenant une couche dopée δ , située à une distance de 2 nm de l'interface GaAs/GaAlAs du TEGFET, comprenant des atomes de Beryllium, ayant un rôle d'accepteur, à une densité de 4.10^{-10} .cm⁻²,
- [0120] [Fig.12] la [Fig.12] est un graphique illustrant l'évolution du courant drain-source en fonction de la tension drain-source pour différentes tensions grilles-source à une température de 1,5 K du TEGFET illustré sur la FIGURE 9b) comprenant une couche dopée δ , située à une distance de 2,5 nm de l'interface GaAs/GaAlAs du TEGFET, comprenant des atomes de Beryllium, ayant un rôle d'accepteur, à une densité de 8.10^{-10} .cm⁻².

Description des modes de réalisation

- [0121] Les modes de réalisation décrits ci-après étant nullement limitatifs, on pourra notamment considérer des variantes de l'invention ne comprenant qu'une sélection de caractéristiques décrites, isolées des autres caractéristiques décrites (même si cette sélection est isolée au sein d'une phrase comprenant ces autres caractéristiques), si cette sélection de caractéristiques est suffisante pour conférer un avantage technique ou pour différencier l'invention par rapport à l'état de la technique antérieure. Cette sélection comprend au moins une caractéristique, de préférence fonctionnelle sans détails structurels, ou avec seulement une partie des détails structurels si cette partie uniquement est suffisante pour conférer un avantage technique ou pour différencier l'invention par rapport à l'état de la technique antérieure.
- [0122] En référence à la [Fig.1] est illustré un TEGFET classique de l'état de la technique. Ce TEGFET comprend un empilement d'au moins deux couches 21, 22 de semi-conducteur, un drain 3, une source 4, un canal 6 et une grille métallique externe supérieure 50 formée d'une couche de métal.
- [0123] De nombreux TEGFETs de l'état de la technique comprennent une grille faite d'un métal déposé sur la couche semiconductrice 21 (communément appelé grille Schottky) sans diffusion depuis la grille métallique externe supérieure 50 vers la couche 21 et le canal 6. D'autres TEGFETs de l'état de la technique comprennent un diélectrique pour isoler électriquement la grille métallique externe supérieure 50 de la couche 21 et du canal 6.
- [0124] En référence aux figures 2 et 3, il est présenté un mode de réalisation du TEGFET 1 selon l'invention. Le TEGFET 1 selon le mode de réalisation comprend un drain 3, une source 4 et au moins un canal 6, un unique canal 6 sur le mode réalisation présenté, compris dans une hétérostructure formée par un empilement d'au moins deux couches 21, 22 de semiconducteur. Le canal 6 relie, selon sa longueur notée L, qui est sa plus grande dimension, la source 4 et le drain 3.
- [0125] Le TEGFET 1 comprend au moins deux grilles latérales 5 disposées chacune d'un côté opposé de l'au moins un canal 6. Selon le mode de réalisation présenté, le TEGFET 1 comprend deux grilles latérales 5 disposées de part et d'autres du canal 6. Chacune des grilles latérales 5 est en vis-à-vis d'un côté latéral 7, 71, 72 différent du canal 6 parmi deux côtés latéraux 7, 71, 72 du canal 6. Le côté 7, 71, 72 du canal 6 comprend l'épaisseur, notée e, du canal 6 qui est la plus petite dimension du canal 6. L'épaisseur e du canal 6 s'étend selon un axe d'empilement 8 des au moins deux couches 21, 22 de semiconducteur et s'étend perpendiculairement à la longueur L du canal 6. Le côté 7, 71, 72 du canal 6 comprend également la longueur L du canal 6. Le côté 7, 71, 72 du canal 6 est une surface ou une interface qui s'étend selon la longueur L du canal 6 et selon l'épaisseur e du canal 6.
- [0126] Le TEGFET 1 ne comprend pas de grille inférieure positionnée en dessous ou de

grille supérieure 50 positionnée au-dessus du canal 6 par rapport à un axe 8 perpendiculaire au plan de canal selon lequel s'étend le canal 6. Le plan de canal est perpendiculaire à l'épaisseur e du canal 6. En outre, l'axe d'empilement 8 est perpendiculaire au plan de canal. Autrement dit, le TEGFET 1 selon l'invention ne comprend pas de grille inférieure positionnée en dessous du canal 6 selon l'axe d'empilement 8 ou de grille supérieure 50 positionnée au-dessus du canal 6 selon l'axe d'empilement 8. L'absence de grille supérieure permet d'éviter l'ensemble des problèmes rencontrés avec les transistors de l'état de la technique tels que, entre autres, les courants de fuite de grille, les défauts d'interfaces et la fragilité de la grille.

- [0127] Selon le mode de réalisation, le TEGFET 1 comprend un empilement fait par exemple d'un substrat de GaAs, d'une couche de GaAlAs d'une épaisseur comprise entre 5 nm et 50 nm, d'une couche 22 de GaAs d'une épaisseur comprise entre 10 et 100 nm, qui constitue le canal, et d'une couche 21 GaAlAs d'une épaisseur comprise entre 50nm et 300nm. Dans cette configuration, le canal 6 est situé dans la couche de GaAs au niveau de l'interface entre les couches 21 et 22.
- [0128] Les grilles latérales 5 selon l'invention associées à l'absence de grille supérieure 50 ou inférieure permet de moduler et/ou modifier et/ou faire varier le potentiel dans le canal 6 selon l'axe latéral 10. L'axe latéral 10 est compris dans le plan de canal et est perpendiculaire à l'axe reliant la source 4 et le drain 3. L'axe latéral 10 est également perpendiculaire à l'axe d'empilement 8.
- [0129] Contrairement aux TEGFETs de l'état de l'art qui comprennent une grille supérieure 50 ou inférieure et qui, tel qu'illustré sur les figures 6a), b) et c), modifient donc la densité d'électrons du gaz d'électron bidimensionnel sur l'ensemble de la largeur, notée l , du canal 6 ; l'agencement particulier du TEGFET 1 selon l'invention permet, tel qu'illustré sur les figures 7a), b) et c), de modifier et moduler le potentiel dans le canal 6 uniquement selon l'axe latéral 10. Ainsi, selon l'invention, le courant de saturation drain-source est contrôlé par la modification de la densité de courant dans le canal 6 alors que dans les TEGFETs à grilles supérieure 50 ou inférieure il est contrôlé par la modification uniforme sur l'ensemble de l'axe latéral 10 de la densité d'électrons du gaz d'électron bidimensionnel.
- [0130] Selon l'invention, il est également décrit un procédé de modulation de la conductivité du canal 6 du TEGFET 1 selon l'invention. Le procédé comprend l'étape consistant à appliquer une différence de potentiel entre la source 4 et le drain 3. Le procédé comprend également l'étape consistant à appliquer :
- une même différence de potentiel entre chacune des grilles latérales 5 et la source 4, ou
 - un même potentiel sur une des grilles latérales 5 et sur la source 4 et une différence de potentiel entre une autre des grilles latérales 5 et la source 4, ou

- une différence de potentiel entre chacune des grilles latérales 5 et la source 4.

Le potentiel, identique ou différent, appliqué entre une ou chacune des grilles latérales 5 et la source 4 peut être nul ou différent de zéro.

- [0131] L'étape consistant à appliquer un même potentiel ou une différence de potentiel entre l'au moins une grille latérale 5 et la source 4 et/ou à appliquer un même potentiel ou une différence de potentiel entre au moins une grille latérale 5 et une autre grille latérale 5 a pour effet de faire varier le potentiel dans le canal 6 le long de l'axe latéral 10.
- [0132] L'absence de grille supérieure 50 ou inférieure dans le TEGFET selon l'invention implique que le procédé de modulation de la conductivité du canal 6 ne comprend pas d'étape consistant faire varier de manière uniforme la densité du gaz d'électrons bidimensionnel sur l'ensemble de la largeur l du canal 6.
- [0133] Les deux grilles latérales 5 sont composées d'un matériau semiconducteur. Les deux grilles latérales 5 comprennent des atomes de métal diffusés dans le matériau semiconducteur. Selon le mode de réalisation présenté, les deux grilles latérales 5 sont composées d'un empilement d'une couche 22 de GaAs d'une épaisseur comprise entre 10 et 100 nm et d'une couche 21 de GaAlAs d'une épaisseur comprise entre 50 et 300 nm. L'empilement de couches GaAs/GaAlAs des grilles latérales 5 comprend des atomes de métal diffusés.
- [0134] Chacune des grilles latérales 5 s'étend selon l'axe d'empilement 8 depuis la couche métallique supérieure externe 9, 91 au-delà du canal 6 selon la direction reliant la couche métallique supérieure externe 9, 91 au canal 6.
- [0135] Les atomes de métal diffusés s'étendent dans l'empilement de couches 21, 22 sur une distance comprise entre 100 et 300 nm depuis la couche métallique supérieure externe 9 selon la direction reliant la couche métallique supérieure externe 9, 91 au canal 6.
- [0136] Aussi, contrairement au grille métallique externe supérieure ou inférieure 50 des TEGFETs de l'état de l'art, les grilles latérales 5 selon l'invention sont en matériau semiconducteur comprenant des atomes de métal diffusés. En outre, les grilles latérales 5 selon l'invention ne sont pas des couches externes mais s'étendent dans la structure du TEGFET 1 selon l'axe d'empilement 8. Ceci a pour avantage d'améliorer la solidité mécanique des grilles. En outre, ceci a également pour avantage d'augmenter considérablement le potentiel appliqué avant d'endommager les grilles. Enfin, cela permet également d'étendre le potentiel appliqué au-delà de la largeur l du ou des canaux 6 et d'obtenir ainsi un effet électrique optimal et homogène sur l'ensemble de la largeur l du gaz d'électrons.
- [0137] Le drain 3 et la source 4 s'étendent selon l'axe d'empilement 8 depuis, respectivement, la couche métallique supérieure externe 9, 92 et la couche métallique supérieure externe 9, 93 au-delà du canal 6 selon la direction reliant la couche métallique

externe supérieure 9, 92 au canal 6 et reliant la couche métallique externe supérieure 9, 93 au canal 6. Les atomes de métal diffusés s'étendent dans l'empilement de couches 21, 22 sur une distance comprise entre 100 et 300 nm depuis, respectivement, la couche métallique supérieure externe 9, 92 et la couche métallique supérieure externe 9, 93 au-delà du canal 6 selon la direction reliant la couche métallique supérieure externe 9, 92 au canal 6 et reliant la couche métallique supérieure externe 9, 93 au canal 6.

[0138] La couche métallique supérieure externe 9, 91, 92, 93 ainsi que les atomes de métal diffusés sont un eutectique qui comprend de l'or, du germanium et du nickel.

[0139] Selon l'invention, aucune des grilles latérales 5 n'est en contact ni ne présente de partie commune ou d'interface commune avec le canal 6. En outre, le TEGFET 1 comprend un diélectrique 11 disposé entre chacune des grilles latérales 5 et le canal 6. Le diélectrique 11 est, de préférence, agencé sous forme d'un évidement 11. De préférence encore, le diélectrique 11 contenu dans l'évidement 11 est un gaz. Selon le mode de réalisation non limitatif présenté, le gaz est de l'air. Le gaz peut être de l'azote ou d'autres gaz présentant des propriétés diélectriques.

[0140] Chacune de ces caractéristiques, c'est-à-dire (i) l'absence de contact ou de partie commune ou d'interface commune entre les grilles latérales 5 et le canal 6, (ii) la présence d'un diélectrique disposé entre chacune des grilles latérales 5 et (iii) l'agencement du diélectrique sous forme d'évidement, contribue, individuellement, à augmenter la tension de claquage, diminuer le courant de fuite et améliorer les caractéristiques du TEGFET 1.

[0141] Sur les figures 3a) et 3b) sont présentées, à titre d'exemples non limitatifs, deux configurations possibles du TEGFET 1 selon l'invention. Le gaz d'électrons bidimensionnel peut se trouver confiné au niveau :

- d'une hétérojonction, illustrée sur la figure 3a), ou
- d'un puit quantique, illustré sur la figure 3b).

Dans le cas d'une hétérojonction, le canal 6 se trouve à l'interface entre deux couches 21, 22 de semiconducteurs différents. Dans ce cas, les semiconducteurs constituant les couches 21, 22 présentent une largeur de bande interdite, dit gap, différente, mais appartiennent au même groupe. Le canal 6 est donc situé dans une couche de semiconducteur, ici la couche 22, dans laquelle les électrons du gaz bidimensionnel sont confinés et accolés à l'interface de l'hétérojonction.

Dans le cas d'un puit quantique, le canal 6 est situé dans la couche 24 d'un semiconducteur à petit gap, par exemple un gap inférieur à 1 électronvolt (eV), déposée entre deux couches 23, 25 d'un même semiconducteur à grand gap, par exemple un gap supérieur à 1 eV.

[0142] Le plan de canal est parallèle au plan selon lequel s'étend l'interface de

l'hétérojonction ou de la couche 24 du semiconducteur à petit gap dans le cas du puit quantique.

- [0143] Sur la [Fig.4] est présentée une configuration dans laquelle le TEGFET 1 comprend plusieurs canaux 6. Selon le mode de réalisation présenté, le TEGFET 1 comprend 3 canaux 6. Les canaux sont superposés selon l'axe d'empilement 8. Les plans de canal de chacun des canaux 6 sont parallèles entre eux. Cette configuration est rendue possible par l'utilisation des grilles latérales 5 selon l'invention. Cette configuration a pour effet de permettre l'augmentation de la densité de courant.
- [0144] Sur la [Fig.5] est présentée une configuration dans laquelle une des grilles latérales du TEGFET 1 est électriquement connectée à la source 4.. Dans cette configuration, une des grilles latérales 5 et la source 4 sont physiquement reliées par l'empilement de couches 21, 22 et par la couche métallique externe supérieure 9, 91, 93. La source 4 et la grille latérale 5 connectée à la source 4 sont donc au même potentiel. En outre, les atomes de métal diffusés s'étendent dans la partie de l'empilement de couches 21, 22 reliant la grille latérale 5 connectée à la source 4 et la source 4.
- [0145] En référence à la [Fig.8], il est également décrit un procédé de fabrication d'un TEGFET 1 selon l'invention. Le procédé de fabrication comprend une unique étape de recuit pour former, simultanément en une même étape, l'ensemble des contacts ohmiques du TEGFET 1. Il s'agit des contacts ohmiques entre :
- la couche de métal externe supérieure 9, 92 du drain 3, et
 - la couche de métal externe supérieure 9, 93 de la source 4, et
 - la couche de métal externe supérieure 9, 91 de chacune des grilles 5.
- [0146] Chacune des couches métalliques externe supérieure 9, 91, 92, 93 est destinée à former un contact électrique par lesquels le TEGFET 1 sera connecté à une alimentation externe.
- [0147] Préalablement à l'étape de recuit, le procédé peut comprendre le dépôt, par exemple par évaporation, des couches de métal 9, 91, 92, 93 sur la surface externe supérieure respectivement du drain 3, de la source 4 et des grilles latérales 5.
- [0148] La température de recuit est comprise entre 300 et 450 °C. La durée de l'étape de recuit est comprise entre 10 secondes et 3 minutes.
- [0149] L'étape de recuit induit la diffusion ou a pour effet de faire diffuser les atomes de métal depuis chacune des couches de métal externe supérieure 9, 91, 92, 93 à l'intérieur de la couche de semiconducteur 21. De préférence, le temps et la température de recuit sont choisies pour que les atomes de métal diffusent depuis chacune des couches de métal 9, 91, 92, 93 à l'intérieur de couches 21, 22 de semiconducteurs.
- [0150] L'étape de recuit a pour effet de former un contact ohmique entre les couches de métal externes supérieures 9, 91, 92, 93 et le drain 3, la source 4 et, en particulier, les grilles latérales 5.

- [0151] Dans les TEGFETs de l'état de l'art, la diffusion des atomes de métal depuis la couche de métal externe supérieure 50 formant la grille métallique externe supérieure 50 ou inférieure est proscrite pour éviter le court-circuit, et/ou éviter d'abaisser la tension de claquage et/ou pour limiter les courants de fuite. A cet effet, il est nécessaire de déposer la couche de métal externe supérieure 50 formant la grille métallique externe supérieure 50 ou inférieure après avoir réalisé l'étape de recuit pour former le contact ohmique entre la couche de métal externe supérieure 9, 92 du drain 3 et la couche de métal externe supérieure 9, 93 de la source 4. Ainsi, le procédé de fabrication du TEGFET 1 selon l'invention selon l'invention comprend moins d'étape et offre donc un gain de temps et d'énergie.
- [0152] Sur les figures 10, 11 et 12 sont présentés les performances et caractéristiques de deux géométries de canal 6 différentes du TEGFET 1 selon l'invention telles qu'illustrées sur la [Fig.9]. Dans la première géométrie illustrée sur la FIGURE 9a), dite TEGFETa) 1, le canal 6 présente une longueur de 730 μm entre la source 4 et le drain 3 et une épaisseur de 10 μm entre les côtés 7, 71 et 7, 72 du canal 6. Dans la deuxième géométrie illustrée sur la FIGURE 9b), dite TEGFETb) 1, le canal 6 présente une longueur de 30 μm entre la source 4 et le drain 3 et une épaisseur de 10 μm entre les côtés 7, 71 et 7, 72 du canal 6.
- [0153] Sur la FIGURE 10a) est présentée l'évolution du courant drain-source, noté I_{DS} , en fonction de la tension drain-source, notée V_{DS} , pour différentes tensions grilles-source, notées V_{GS} , à une température de 300 K pour le TEGFETb) 1. La différence de potentiel est appliquée entre une des deux grilles latérales 5 et la source 4. En particulier, une des grilles latérales 5 est à la masse et l'autre est polarisée. Il est à noter que même lorsque V_{GS} est égale zéro, une saturation de I_{DS} est tout de même observée. Lorsque V_{GS} est égale zéro, les grilles latérales 5 sont au même potentiel que la source 4 qui est reliée à la masse selon le mode de réalisation. En outre, pour une polarisation négative des grilles latérales 5, c'est-à-dire pour V_{GS} inférieure à zéro, I_{DS} diminue et lorsque V_{GS} est positive I_{DS} augmente. Ainsi, cette configuration permet de retrouver les caractéristiques classiques d'un TEGFET.
- [0154] Sur la FIGURE 10b) est représentée l'évolution du potentiel dans le canal 6 selon l'axe latéral 10 à l'extrémité du canal 6 située du côté de la source 4, notée V_{YS} , en fonction de V_{DS} pour une température de 300 K pour le TEGFETb) 1. Sur la FIGURE 10c) est représentée l'évolution du potentiel dans le canal 6 selon l'axe latéral 10 à l'extrémité du canal 6 située du côté du drain 3, notée V_{YD} , en fonction de V_{DS} pour une température de 300 K pour le TEGFETb) 1. La densité de porteurs du gaz d'électrons bidimensionnel est dans ce cas de $2,4 \cdot 10^{11} \cdot \text{cm}^{-2}$ à 300 K et de $1,1 \cdot 10^{11} \cdot \text{cm}^{-2}$ à 1,5 K.
- Il est à noter que lorsque V_{GS} est égale à 0 ni V_{YS} ni V_{YD} n'est égal à 0 ce qui indique que même dans ce cas les charges peuvent s'accumuler le long de chacun des côtés 7,

71 et 72 du canal 6. Toutefois, V_{YS} et V_{YD} n'est tendent vers 0 si les grilles latérales 5 sont maintenues au même potentiel à potentiel flottant, ce qui démontre que les grilles latérales 5 modifient fortement le potentiel selon l'axe latéral 10 et selon la longueur L du canal 6 et ce même si V_{GS} est égal à 0.

On note également que ces résultats confirment l'effet direct et conséquent de V_{GS} sur le potentiel dans le canal 6 selon l'axe latéral 10 et sur le potentiel dans le canal 6 selon l'axe selon la longueur L du canal 6.

[0155] Sur la [Fig.11] est présentée l'évolution du courant drain-source, noté I_{DS} , en fonction de la tension drain-source, notée V_{DS} , pour différentes tensions grilles-source, notées V_{GS} , à une température de 300 K pour le TEGFETb) 2 comprenant une couche dopée δ comprenant des atomes de Beryllium, ayant un rôle d'accepteur, à une densité de $4.10^{10} \text{ .cm}^{-2}$. La couche dopée δ est située à une distance de 2 nm de l'interface GaAs/GaAlAs. La densité de porteurs du gaz d'électrons bidimensionnel est dans ce cas de $2,7.10^{11} \text{ .cm}^{-2}$ à 300 K et de $1,25.10^{11} \text{ .cm}^{-2}$ à 1,5 K. Ceci démontre que la géométrie du TEGFET 1 n'influence pas les caractéristiques, en particulier l'évolution I_{DS} en fonction de V_{DS} , du TEGFET 1 selon l'invention. Le courant I_{DS} de saturation ainsi que la stabilité de I_{DS} restent inchangés quelle que soit la géométrie du TEGFET 1.

[0156] Sur la [Fig.12] est présentée l'évolution du courant drain-source, noté I_{DS} , en fonction de la tension drain-source, notée V_{DS} , pour différentes tensions grilles-source, notées V_{GS} , à une température de 1,5 K pour le TEGFETb) 2 comprenant une couche dopée δ comprenant des atomes de Beryllium, ayant un rôle d'accepteur, à une densité de $8.10^{10} \text{ .cm}^{-2}$. La couche dopée δ est située à une distance de 2,5 nm de l'interface GaAs/GaAlAs. L'encart de la [Fig.12] illustre l'évolution du courant drain-source, noté I_{DS} , lors d'une variation continue, c'est-à-dire sans interruption de la variation de la tension, de la tension V_{GS} entre -0,5 Volts et +0,5 Volts puis entre +0,5 Volts et -0,5 Volts à une température de 1,5 K, avec une densité de porteurs du gaz d'électrons bidimensionnel de $6.10^{10} \text{ .cm}^{-2}$, et à une température de 300 K, avec une densité de porteurs du gaz d'électrons bidimensionnel de $1,6.10^{11} \text{ .cm}^{-2}$.

On note également qu'à 1,5 K, la qualité de l'évolution I_{DS} en fonction de V_{DS} est maintenue comparée à 300 K présentée aux figures 10 et 11. Ceci démontre que même pour une densité de porteurs faibles, $8.10^{10} \text{ .cm}^{-2}$, le TEGFET 1 présente un faible bruit et est donc compatible pour les applications à basses températures.

[0157] Bien sûr, l'invention n'est pas limitée aux exemples qui viennent d'être décrits et de nombreux aménagements peuvent être apportés à ces exemples sans sortir du cadre de l'invention.

[0158] De plus, les différentes caractéristiques, formes, variantes et modes de réalisation de l'invention peuvent être associés les uns avec les autres selon diverses combinaisons dans la mesure où ils ne sont pas incompatibles ou exclusifs les uns des autres.

Revendications

- [Revendication 1] Transistor à effet de champ à gaz d'électrons bidimensionnel (1), dit TEGFET, ledit TEGFET comprend un drain (3), une source (4) et au moins un canal (6) compris dans une hétérostructure formée par un empilement d'au moins deux couches (21, 22) de semiconducteur ; l'au moins un canal relie, selon sa plus grande dimension, dite longueur (L) de l'au moins un canal, la source et le drain ; ledit TEGFET étant caractérisé en ce que :
- il comprend au moins deux grilles latérales (5) disposées de part et d'autre de l'au moins un canal et disposées, chacune, en vis-à-vis d'un côté (7, 71, 72) de l'au moins un canal, lesdits côtés de l'au moins un canal comprennent une plus petite dimension dudit au moins canal, dite épaisseur (e) de l'au moins un canal, s'étendant selon un axe (8) selon lequel sont empilées les au moins deux couches de semiconducteur et s'étendant perpendiculairement à la longueur de l'au moins un canal, et
 - il ne comprend pas de grille positionnée en dessous ou au-dessus de l'au moins un canal par rapport à un axe perpendiculaire à un plan, dit plan de canal, selon lequel s'étend l'au moins un canal entre la source et le drain, ledit plan de canal étant perpendiculaire à l'épaisseur de l'au moins un canal.
- [Revendication 2] TEGFET selon la revendication 1, dans lequel aucune des grilles latérales (5) parmi les au moins deux grilles latérales n'est en contact ni ne présente de partie commune ou d'interface commune avec l'au moins un canal (6).
- [Revendication 3] TEGFET selon la revendication précédente 1 ou 2, dans lequel les au moins deux grilles latérales (5) sont agencées pour moduler et/ou modifier et/ou faire varier le potentiel dans l'au moins un canal (6) selon un axe (10), dit latéral, compris dans le plan de canal et perpendiculaire à l'axe reliant la source et le drain.
- [Revendication 4] TEGFET selon l'une des revendications précédentes, comprenant un diélectrique (11) disposé entre chacune des grilles latérales (5), parmi les au moins deux grilles latérales, et l'au moins un canal (6).
- [Revendication 5] TEGFET selon la revendication précédente, dans lequel le diélectrique (11) est agencé sous forme d'un évidement (11).
- [Revendication 6] TEGFET selon la revendication précédente, dans lequel l'évidement (11) comprend un gaz.
- [Revendication 7] TEGFET selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans

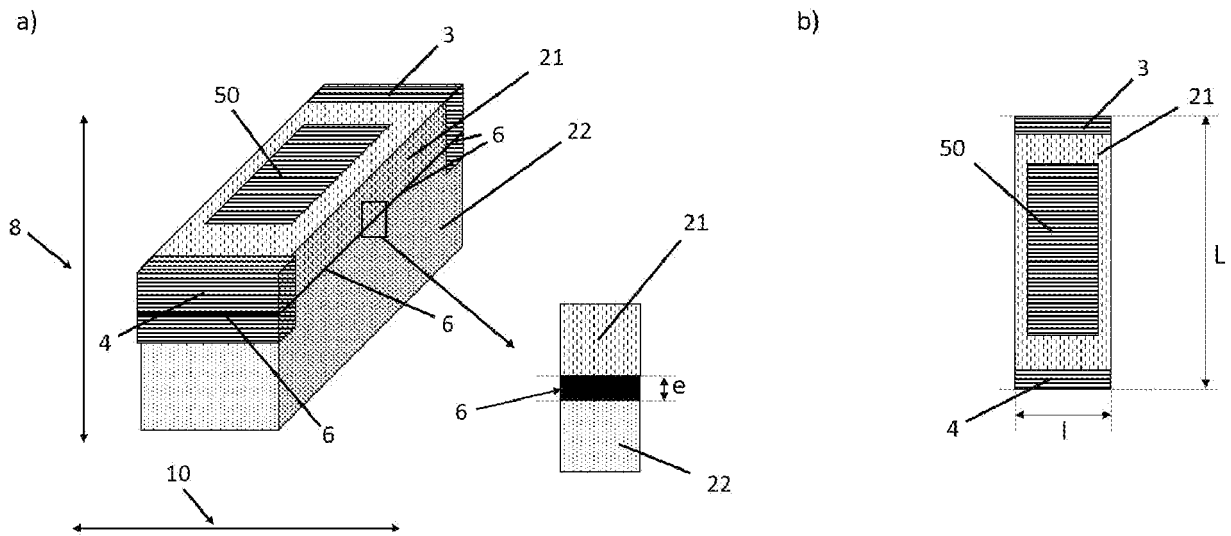
- lequel les au moins deux grilles latérales (5) sont composées d'un matériau semiconducteur.
- [Revendication 8] TEGFET selon la revendication précédente, dans lequel le matériau semiconducteur composant les au moins deux grilles latérales (5) comprend des atomes de métal diffusés dans le matériau semiconducteur.
- [Revendication 9] TEGFET selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel une des grilles latérales (5) est électriquement connectée à la source (4).
- [Revendication 10] Procédé de modulation de la conductivité d'au moins un canal (6) d'un transistor à effet de champ à gaz d'électron bidimensionnel (1), dit TEGFET, ledit procédé comprend les étapes consistant à :
- appliquer une différence de potentiel entre une source (4) et un drain (3) du TEGFET,
 - appliquer :
 - une même différence de potentiel entre au moins une des grilles latérales (5) du TEGFET, parmi au moins deux grilles latérales disposées latéralement de part et d'autre de l'au moins un canal du TEGFET, et la source du TEGFET, et/ou
 - un même potentiel sur une ou chacune des grilles latérales et sur la source du TEGFET, et/ou
 - une différence de potentiel entre au moins une des grilles latérales du TEGFET et la source du TEGFET ;
- l'au moins un canal relie, selon une plus grande dimension de l'au moins un canal, dite longueur (L) de l'au moins un canal, la source et le drain du TEGFET et le TEGFET ne comprend pas de grille positionnée en dessous ou au-dessus de l'au moins un canal par rapport à un axe perpendiculaire à un plan, dit plan de canal, selon lequel s'étend l'au moins un canal entre la source et le drain, ledit plan de canal étant perpendiculaire à une plus petite dimension de l'au moins canal, dite épaisseur (e) de l'au moins un canal, s'étendant selon un axe (8) selon lequel sont empilées au moins deux couches (21, 22) de semiconducteur formant une hétérostructure dans laquelle est comprise l'au moins un canal et s'étendant perpendiculairement à la longueur de l'au moins un canal ; chacune des au moins deux grilles latérales est disposée en vis-à-vis d'un côté (7, 71, 72) de l'au moins un canal, lesdits côtés de l'au moins un canal comprennent l'épaisseur (e) de l'au moins un canal.
- [Revendication 11] Procédé selon la revendication 10, comprenant l'étape consistant à

moduler et/ou modifier et/ou faire varier le potentiel et/ou la conductivité dans l'au moins un canal (6) selon un axe (10), dit latéral, compris dans le plan de canal et perpendiculaire à l'axe reliant la source et le drain, par application d'une même différence de potentiel entre au moins une des grilles latérales (5) et la source (4) et/ou par application du même potentiel sur une ou chacune des grilles latérales et sur la source et/ou par application d'une différence de potentiel entre au moins une des grilles latérales, ou entre chacune des grilles latérales, et la source.

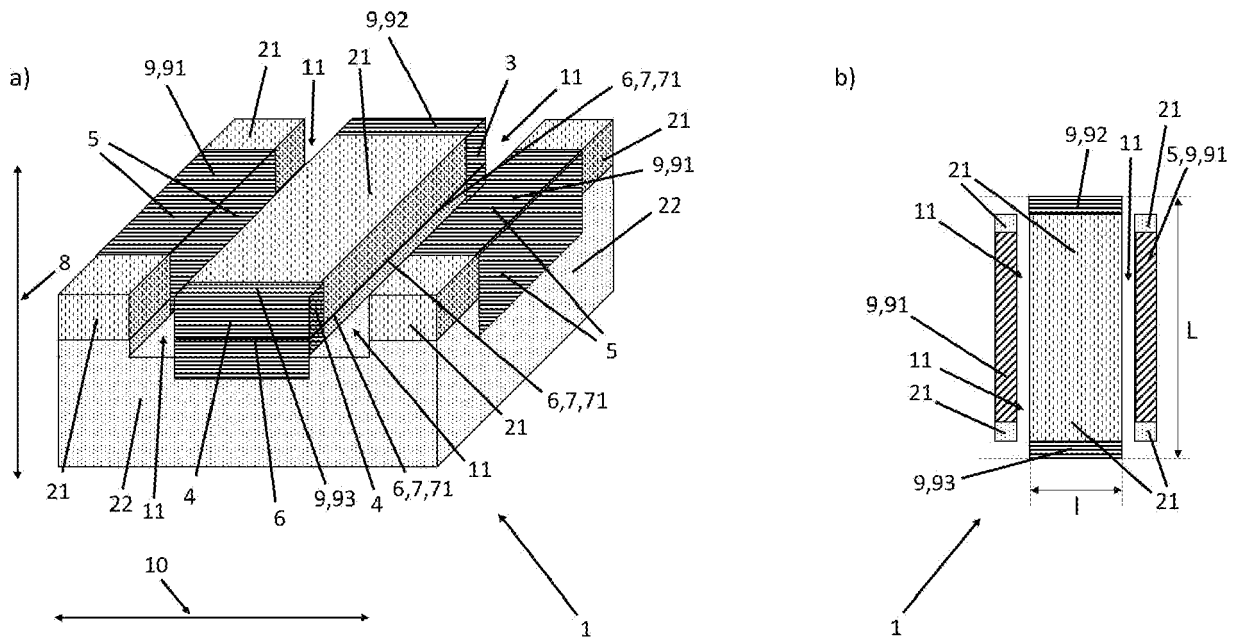
- [Revendication 12] Procédé selon la revendication 10 ou 11, comprenant l'étape consistant à moduler et/ou modifier et/ou faire varier le potentiel dans l'au moins un canal (6) et/ou la conductivité du gaz d'électron bidimensionnel, de manière non uniforme, selon une largeur (l) de l'au moins un canal, la largeur de l'au moins un canal s'étend selon un axe perpendiculaire à la longueur (L) de l'au moins un canal et perpendiculaire à l'épaisseur (e) de l'au moins un canal, par application d'une même différence de potentiel entre au moins une des grilles latérales (5) et la source (4) et/ou par application du même potentiel sur une ou chacune des grilles latérales et sur la source et/ou par application d'une différence de potentiel entre au moins une des grilles latérales, ou entre chacune des grilles latérales, et la source.
- [Revendication 13] Procédé selon l'une des revendications 10 à 12, ledit procédé comprend une étape consistant à moduler et/ou modifier et/ou faire varier la densité d'électrons du gaz d'électron bidimensionnel, de manière non uniforme, sur la largeur de l'au moins un canal.
- [Revendication 14] Procédé de fabrication d'un transistor à effet de champ à gaz d'électron bidimensionnel (1), dit TEGFET, ledit procédé de fabrication comprend une unique étape de recuit pour former, simultanément en une même étape, des contacts ohmiques distincts entre :
- une première couche de métal (9, 92), destinée à former un contact électrique, et un drain (3) du TEGFET, et
 - une deuxième couche de métal (9, 93), destinée à former un contact électrique, et une source (4) du TEGFET, et
 - une troisième couche de métal (9, 91), destinée à former un contact électrique, et au moins deux grilles latérales (5) du TEGFET, disposées latéralement de part et d'autre d'au moins un canal du TEGFET et disposées, chacune, en vis-à-vis d'un côté (7, 71, 72) de l'au moins un canal, lesdits côtés de l'au moins un canal comprennent une plus petite

dimension dudit au moins canal, dite épaisseur (e) de l'au moins un canal, s'étendant selon un axe (8) selon lequel sont empilées les au moins deux couches de semiconducteur et s'étendant perpendiculairement à une longueur de l'au moins un canal.

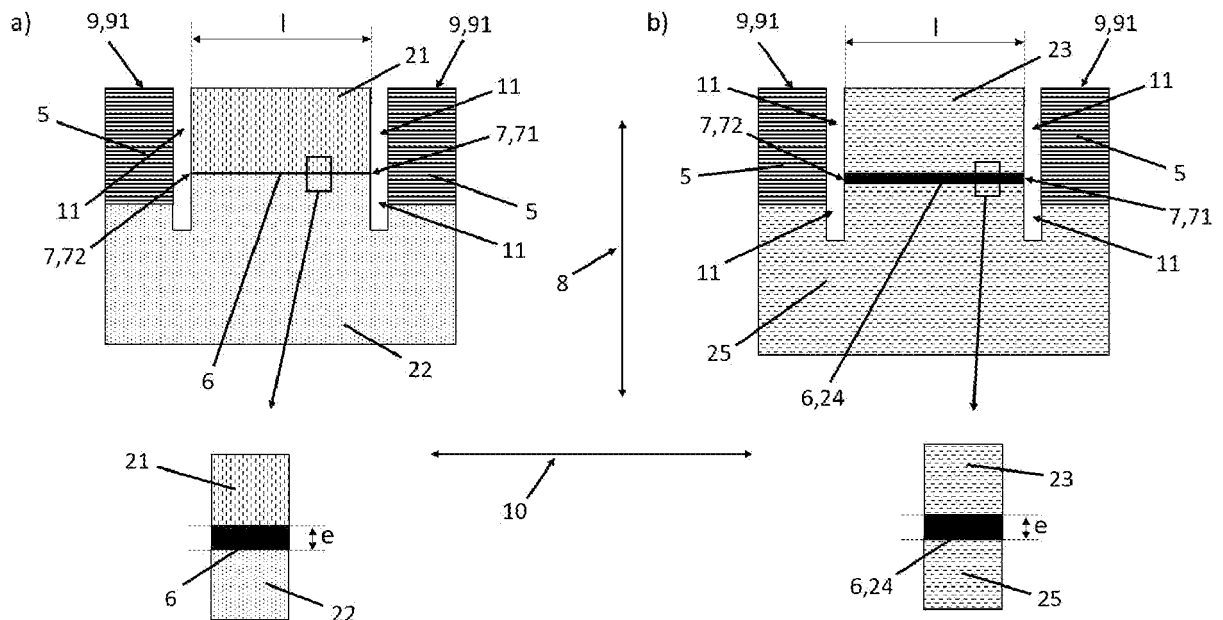
[Fig. 1]



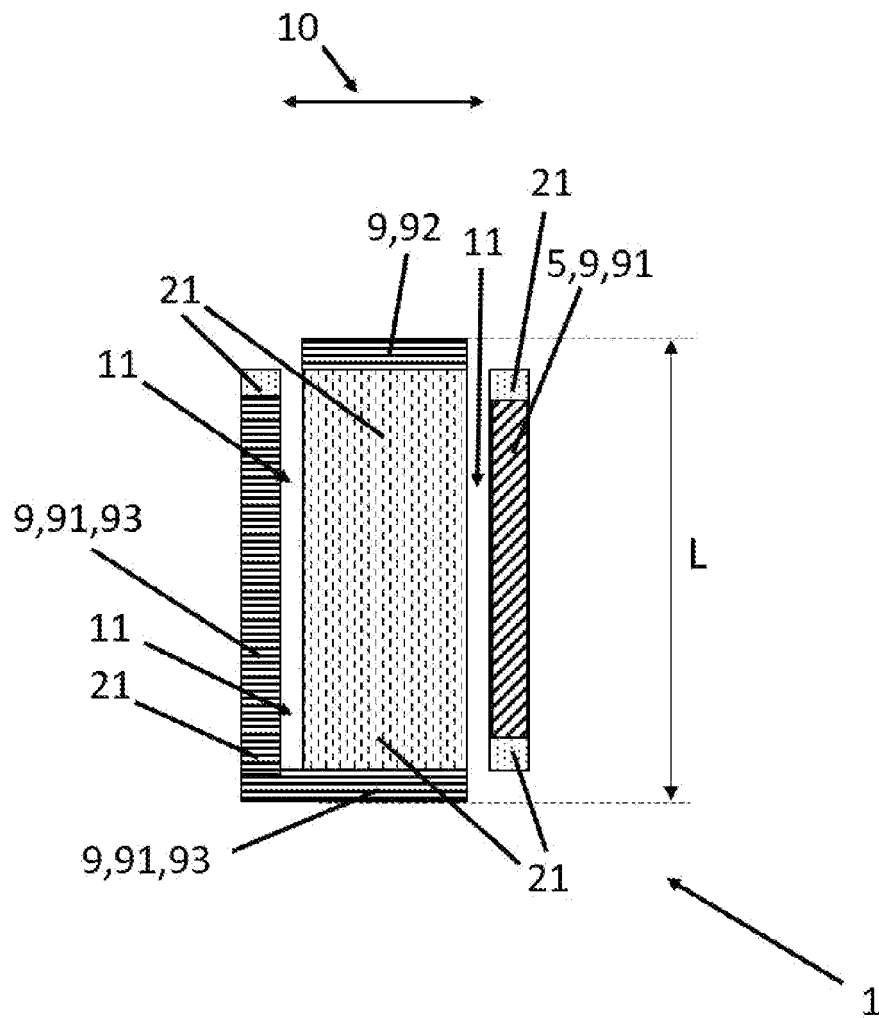
[Fig. 2]



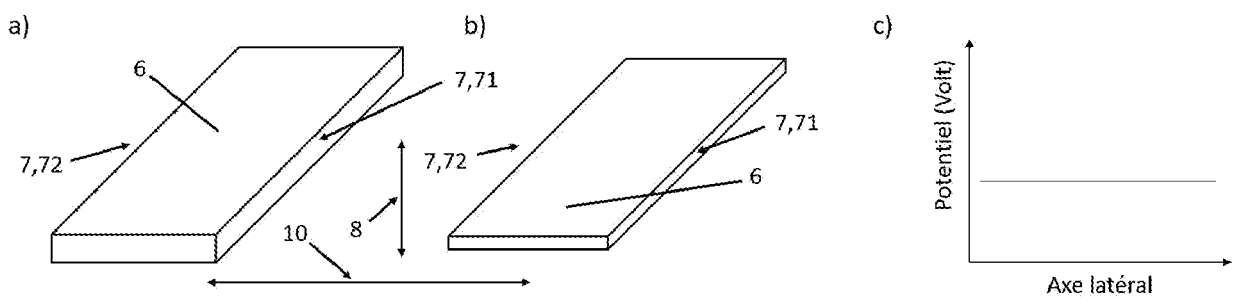
[Fig. 3]



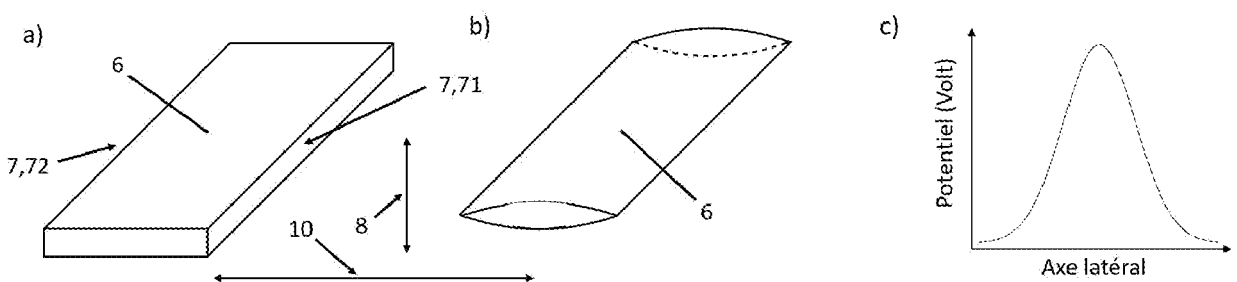
[Fig. 5]



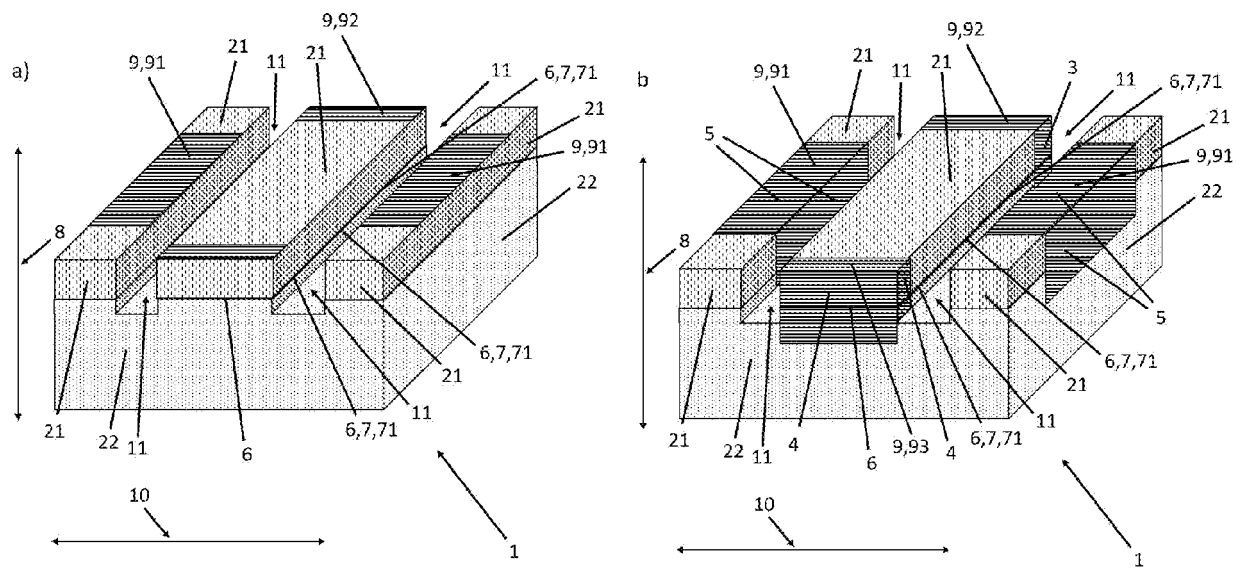
[Fig. 6]



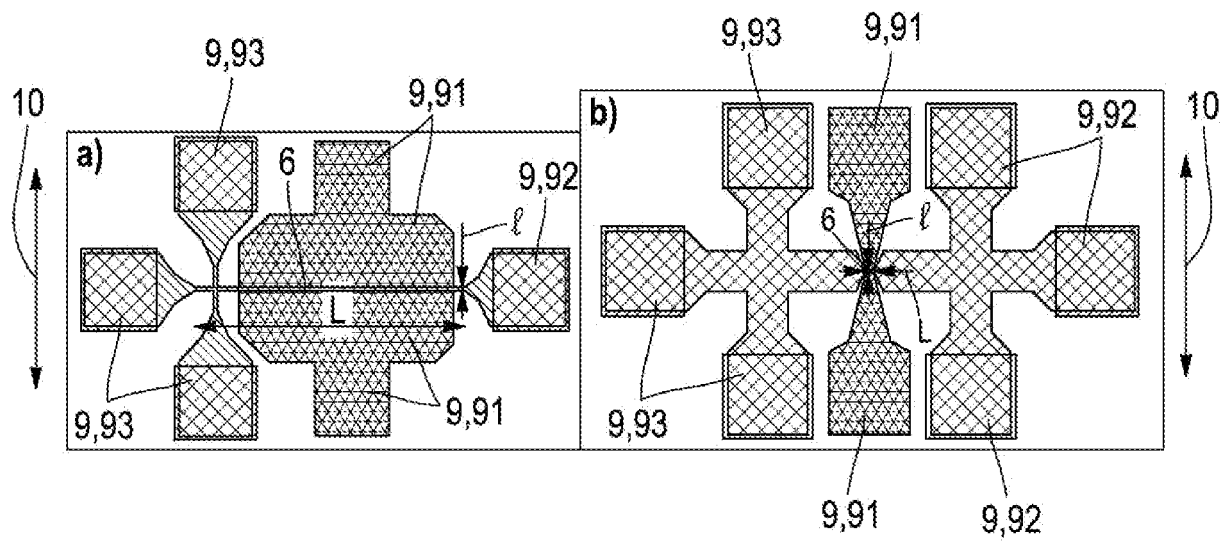
[Fig. 7]



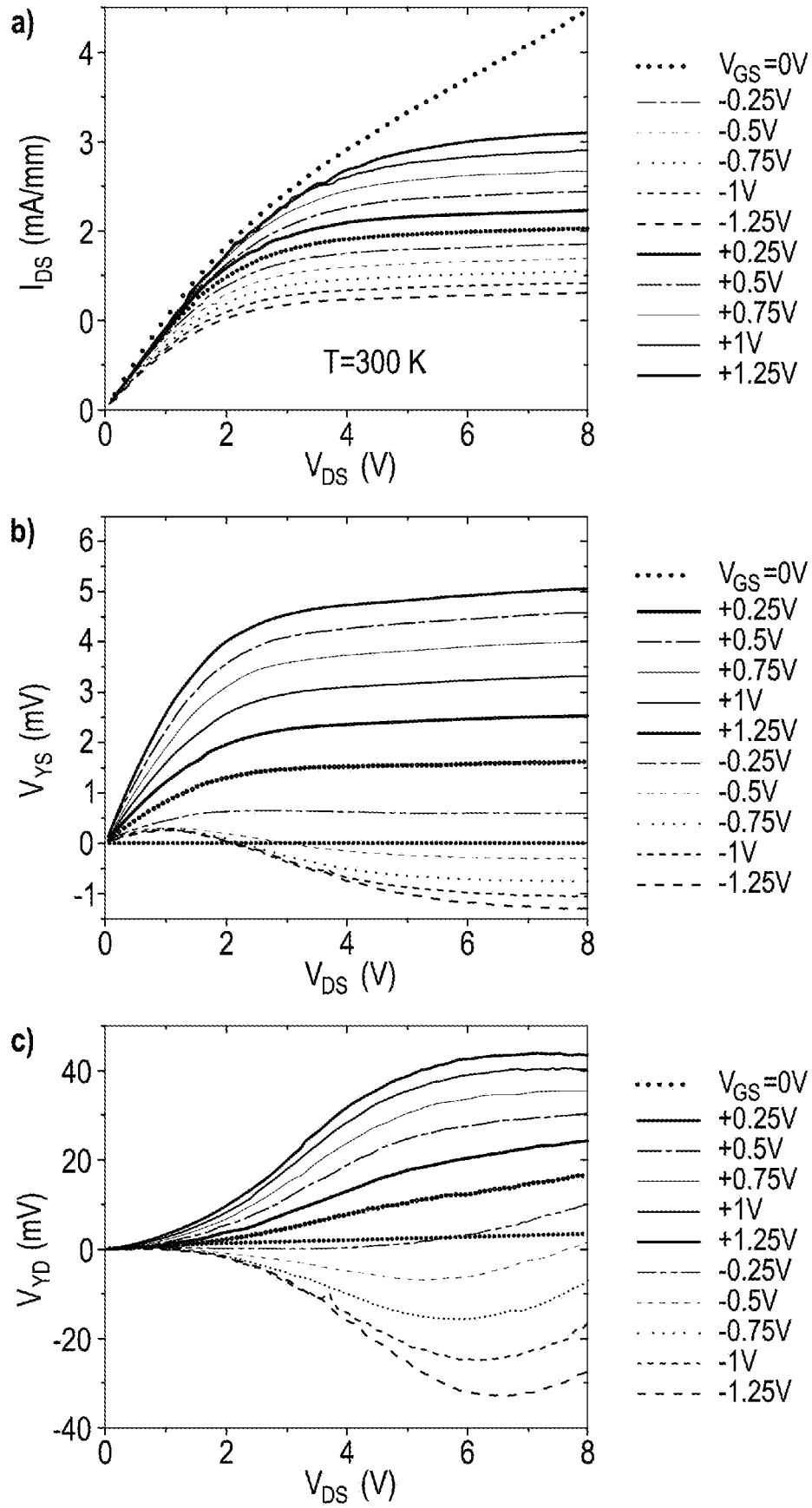
[Fig. 8]



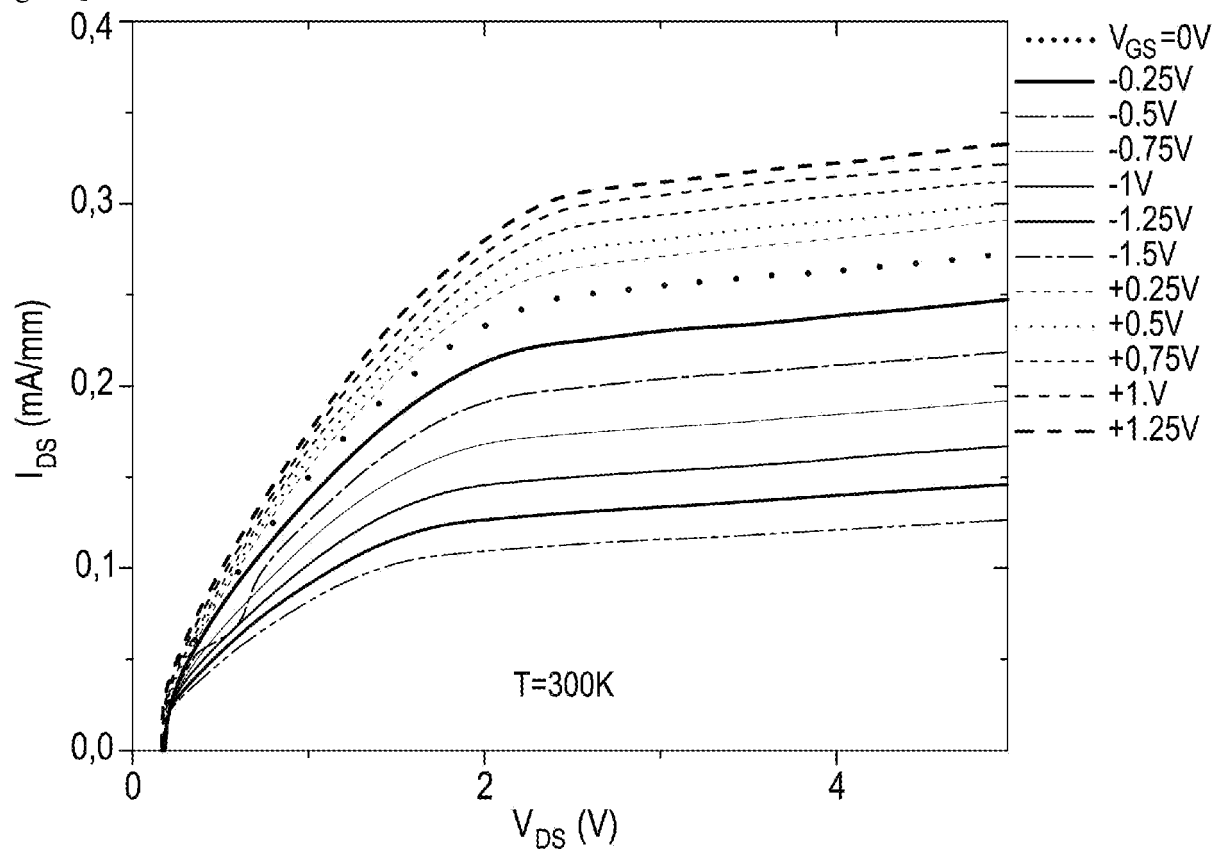
[Fig. 9]



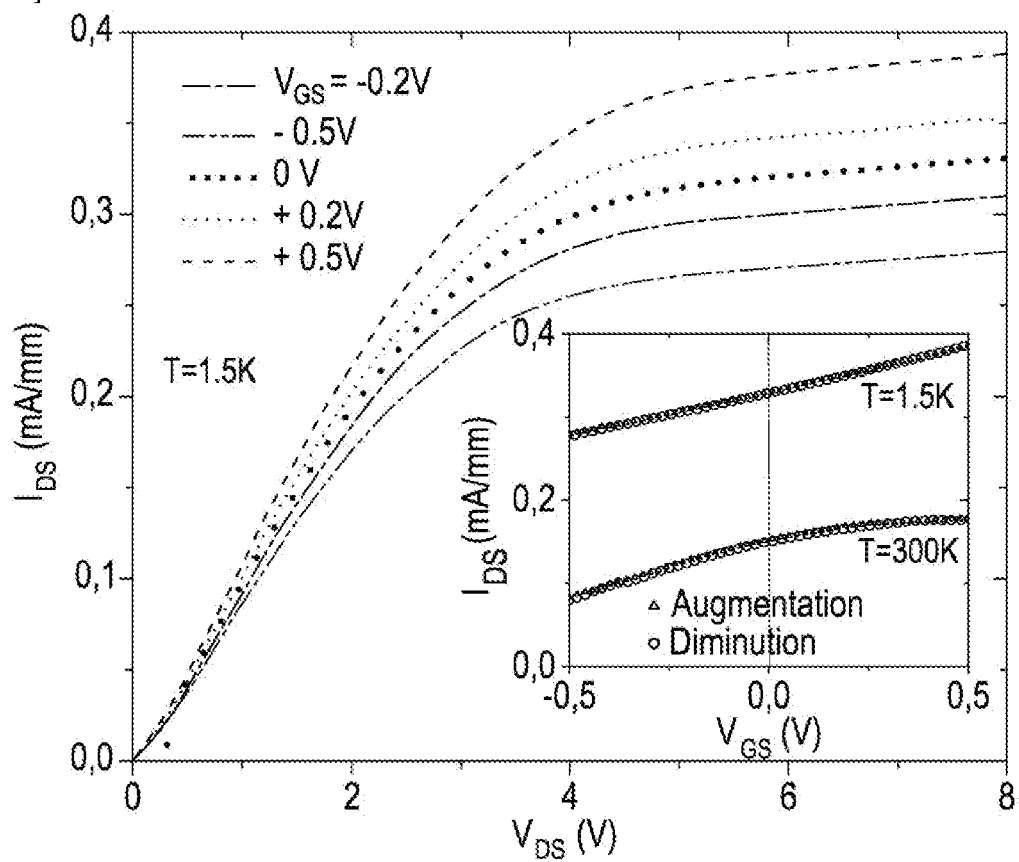
[Fig. 10]



[Fig. 11]



[Fig. 12]



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 907250
FR 2200887

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		
X	ERINE CATHERINE ET AL: "Multi-Channel AlGaIn/GaN In-Plane-Gate Field-Effect Transistors", IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, IEEE, USA, vol. 41, no. 3, 17 janvier 2020 (2020-01-17), pages 321-324, XP011774223, ISSN: 0741-3106, DOI: 10.1109/LED.2020.2967458 [extrait le 2020-02-25] * abrégé * * figures 1, 3 * * partie II *	1-14	H01L29/778 H01L21/02
A	WIECK A D ET AL: "IN-PLANE-GATED QUANTUM WIRE TRANSISTOR FABRICATED WITH DIRECTLY WRITTEN FOCUSED ION BEAMS", APPLIED PHYSICS LETTERS, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, 2 HUNTINGTON QUADRANGLE, MELVILLE, NY 11747, vol. 56, no. 10, 5 mars 1990 (1990-03-05), pages 928-930, XP000133494, ISSN: 0003-6951, DOI: 10.1063/1.102628 * figures 1, 2 * * page 930 *	9	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) H01L
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
2 décembre 2022		Moehl, Sebastian	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			