

⑤④ Structure tridimensionnelle de mémoires pour le calcul dans la mémoire.

②② Date de dépôt : 03.02.22.

③③ Priorité :

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

☐ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public — FR.

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

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 06.12.24 Bulletin 24/49.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑦② Inventeur(s) : DUBREUIL Théophile, AMARI Paul et
BARRAUD Sylvain.

⑦③ Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public.

⑦④ Mandataire(s) : ATOUT PI LAPLACE.



Description

Titre de l'invention : Structure tridimensionnelle de mémoires pour le calcul dans la mémoire Champ d'application

[0001] La présente invention concerne le domaine de la conception de circuits de mémoire calculatoire ou circuit de calcul dans la mémoire (traduite du terme anglais In-Memory Computing). Plus particulièrement, l'invention concerne un circuit de mémoires résistives non-volatiles. Le circuit permet de réaliser des opérations logiques booléennes élémentaires au sein de la structure des mémoires composant le circuit.

Problème technique

[0002] D'une manière générale, un système sur puce comporte des circuits mémoires pour stocker les données et des circuits de calcul pour réaliser des opérations logiques et arithmétiques. Les opérations d'échange de données entre les circuits mémoires et les circuits de calcul sont très énergivores et réduisent la performance de calcul du système. Dans ce contexte, les technologies émergentes des mémoires non-volatiles permettent de réaliser des circuits de mémoire aptes à réaliser à la fois la fonction de stockage et la fonction de calcul. On parle dans ce cas de « circuit de calcul dans la mémoire ». Cela permet d'éviter les transferts de données entre les moyens de stockage et les moyens de calcul, et ainsi, permet de réduire la consommation énergétique et améliorer la vitesse de calcul.

[0003] Cependant, le développement des solutions « circuits de calcul dans la mémoire » présente plusieurs défis et contraintes tels que :

- Le recours à de larges circuits périphériques aux mémoires pour traiter les résultats. Ces circuits périphériques couvrent à titre d'exemple une pluralité d'amplificateurs de détection. Cela augmente considérablement la surface du circuit et la complexité d'implémentation physique.
- Des contraintes au niveau de la précision des calculs réalisés. Plus particulièrement, ce problème se manifeste lors de l'exécution d'algorithmes nécessitant des calculs en parallèle.

[0004] Ainsi, il existe un besoin pour concevoir des nouvelles architectures des circuits de calcul dans la mémoire, qui soient moins complexes et présentant en même temps une réduction de la consommation électrique et une amélioration des performances calculatoires en termes de vitesse et précision.

Art antérieur/ Restrictions de l'état de l'art

[0005] La publication scientifique [1] décrit trois approches générales pour réaliser des opérations de « calcul en mémoire ». Les trois approches reposent sur la programmation d'opérandes au sein des cellules mémoires résistives qui permettent en

retour d'effectuer des sommes et des produits grâce aux lois de Kirchhoff. La première solution est appelée « non-stateful logic » et la deuxième solution est appelée « matrix-vector-multiplication ». Ces deux solutions nécessitent l'utilisation de larges circuits périphériques aux mémoires afin de traiter les résultats bruts. Elles présentent ainsi les inconvénients associés aux circuits périphériques. Ces inconvénients consistent en une complexité d'implémentation, d'une large surface et d'une augmentation de la consommation énergétique. La troisième solution est appelée « stateful logic ». Cette solution ne nécessite pas de circuits périphériques larges. Cependant, elle présente l'inconvénient d'une réduction de la précision de calcul lors de l'exécution d'algorithmes nécessitant des opérations de calculs en parallèle.

- [0006] La publication scientifique [2] propose une structure élémentaire de calcul en mémoire résistive réalisée par l'empilement d'une pluralité de mémoires résistives commandées par un transistor FinFET commun. Cette solution présente l'inconvénient d'une limitation en nombre de mémoires empilées dans une structure élémentaire à cause de l'augmentation des courants de pertes. De plus, cette solution présente des contraintes de programmation car les opérandes et les résultats d'une opération logique doivent être stockés au sein de la même structure élémentaire. Cela réduit les possibilités de programmation du circuit de calcul dans la mémoire et réduit ainsi la performance calculatoire du système.

Réponse au problème et apport solution

- [0007] Pour pallier les limitations des solutions existantes en ce qui concerne la conception de circuits de calcul dans la mémoire, l'invention propose un circuit basé sur une structure tridimensionnelle composée de cellules mémoires résistives, non-volatiles et programmables. De plus, l'invention propose des séquences de programmation spécifiques permettant de réaliser des fonctions logiques élémentaires et des fonctions de transfert de données de manière non destructive. Il est ainsi possible pour la personne du métier d'implémenter des algorithmes plus complexes à partir des fonctions logiques élémentaires et de la fonction de transfert de données.
- [0008] Le dispositif selon l'invention permet de réduire la complexité des circuits périphériques en se limitant à quelques transistors de commandes. Les opérations de calcul ne nécessitent pas de faire recours à des circuits du type amplificateur de détection. Cela réduit la surface du circuit et sa consommation énergétique et simplifie son implémentation physique.
- [0009] Le dispositif selon l'invention permet en outre l'obtention d'un fonctionnement sur les trois dimensions spatiales sans les contraintes d'emplacement de stockage des opérandes et des résultats. Cela offre une flexibilité de programmation plus large que les solutions où les calculs sont localisés dans une seule structure élémentaire.
- [0010] Le dispositif selon l'invention est réalisable avec un nombre de cellules mémoires

considérablement supérieur à celui des solutions connues. Cela offre l'avantage de la multiplication des capacités de stockage et de calcul en même temps. Cela permet d'obtenir un dispositif compatible avec l'exécution d'algorithmes de calcul complexes au sein de la structure mémoires. De plus, le dispositif est capable de paralléliser un nombre considérable d'opérations de traitement de données pour obtenir une performance meilleure.

- [0011] L'invention concerne en outre une structure en couches minces permettant de réaliser la structure de mémoire tridimensionnelle selon l'invention. Cette structure élémentaire présente l'avantage d'une compatibilité avec les techniques de fabrication de l'industrie du semiconducteur. Ainsi, le dispositif selon l'invention présente des couts de mise en production réduits.

Résumé /Revendications

- [0012] L'invention a pour objet un circuit de calcul dans la mémoire comprenant une pluralité de plans mémoire de rang i allant de 1 à N , avec N un entier naturel supérieur à 1, chaque plan formant une matrice bidimensionnelle de cellules mémoire non volatiles, résistives et programmables, chaque cellule mémoire ayant un nœud de sélection, un premier nœud d'entrée/sortie et un second nœud d'entrée/sortie. Ladite matrice comprenant M lignes de rang j allant de 1 à M et K colonnes de rang k allant de 1 à K , avec M et K deux entiers naturels non nuls. Ledit circuit de calcul comprenant :

- des moyens de contrôle pour commander des opérations de stockage et de calcul en mémoire réalisées par le circuit de calcul ;
- au moins un groupe élémentaire de cellules mémoires comprenant :
 - une première cellule mémoire appartenant à l'un quelconque des plans mémoire et destinée à stocker une première donnée d'entrée ;
 - une deuxième cellule mémoire appartenant à l'un quelconque des plans mémoire et destinée à stocker une deuxième donnée d'entrée ;
 - une troisième cellule mémoire appartenant à un plan mémoire différent de celui de la première et de la deuxième cellule mémoire. La troisième cellule mémoire étant destinée à stocker le résultat d'une première opération logique ayant pour opérandes la première et la deuxième donnée d'entrée.

La première, la deuxième et la troisième cellule mémoire appartenant à des colonnes de même rang k dans leurs matrices respectives. La première, la deuxième et la troisième cellule mémoire étant interconnectées par une ligne d'interconnexion commune, notamment afin de former un pont diviseur de tension résistif.

- [0013] Selon un aspect particulier de l'invention, pour chaque plan mémoire: les nœuds de sélection des cellules mémoires appartenant à la même ligne sont inter-

connectés par une ligne de sélection ;

les premiers nœuds d'entrée/sorties des cellules mémoires appartenant à la même colonne sont interconnectés ;

les seconds nœuds d'entrée/sorties des cellules mémoires appartenant à la même colonne sont interconnectés.

[0014] Selon un aspect particulier de l'invention, chaque cellule mémoire comprend :

- une structure de stockage résistive programmable ayant :
 - une électrode supérieure connectée au second nœud d'entrée/sortie de ladite cellule mémoire ;
 - et une électrode inférieure ;
- un transistor de sélection ayant une grille connectée au nœud de sélection de ladite cellule mémoire et reliant l'électrode inférieure au premier nœud d'entrée/sortie de ladite cellule mémoire.

[0015] Selon un aspect particulier de l'invention, chaque colonne de cellules mémoire comprend :

- Un empilement d'une pluralité de transistors de sélection selon une première direction,

chaque transistor de sélection, notamment de type grille enrobante, comprenant un canal de conduction, perpendiculaire à la première direction en un matériau semiconducteur et ayant deux extrémités ;
la première extrémité du canal correspondant à la source du transistor de sélection et la seconde correspondant au drain du transistor ;
- un premier pilier métallique selon la première direction connectant les sources des différents transistors de sélection ;
- une couche en diélectrique parallèle à la première direction et couvrant latéralement les drains des transistors de sélection ;
- au moins une couche métallique en parallèle à la première direction déposée sur la couche en diélectrique ;
- un second pilier métallique selon la première direction ayant un contact latéral avec l'au moins couche métallique ;

Pour chaque transistor de sélection, l'ensemble formé par le drain, la couche en diélectrique et la couche métallique constitue une structure de stockage résistive.

[0016] Selon un aspect particulier de l'invention, pour chaque plan mémoire :

les premiers nœuds d'entrée/sortie des cellules mémoire appartenant aux colonnes de rangs impairs sont interconnectés formant une première ligne de source ;

les premiers nœuds d'entrée des cellules mémoire appartenant aux colonnes de rangs pairs sont interconnectés formant une seconde ligne de source ;

la première ligne de source et la seconde ligne de source étant distinctes.

- [0017] Selon un aspect particulier de l'invention, le groupe élémentaire de cellules mémoires comprend en outre une quatrième cellule mémoire appartenant à un plan mémoire différent de celui de la première, deuxième et troisième cellule mémoire. La quatrième cellule mémoire étant destinée à stocker le résultat d'une deuxième opération logique ayant pour opérandes la première et la deuxième donnée d'entrée et utilisant le résultat de la première opération logique stocké dans la troisième cellule mémoire. La quatrième cellule mémoire étant connectée à la première, à la deuxième et à la troisième cellule mémoire via la ligne d'interconnexion commune.
- [0018] Selon un aspect particulier de l'invention, pour chaque groupe élémentaire de cellules mémoires, la ligne d'interconnexion connecte l'un à l'autre les seconds nœuds d'entrée/sortie des cellules mémoire dudit groupe élémentaire.
- [0019] Selon un aspect particulier de l'invention, la première opération logique est une fonction booléenne OU.
- [0020] Selon un aspect particulier de l'invention, les moyens de contrôle sont configurés pour réaliser les étapes suivantes, dans l'ordre d'énumération, afin de réaliser la fonction logique OU :
- i. Initialiser la troisième cellule à un état résistif haut ;
 - ii. sélectionner la première et la troisième cellule mémoire en mettant à l'état passant leurs transistors de sélection ;
 - iii. appliquer une première tension de lecture positive sur le premier nœud d'entrée/sortie de la première cellule mémoire et connecter simultanément le premier nœud d'entrée/sortie de la troisième cellule mémoire à la masse électrique ;
 - iv. sélectionner la deuxième et la troisième cellule mémoire en mettant à l'état passant leurs transistors de sélection ;
 - v. appliquer la première tension de lecture positive sur le premier nœud d'entrée/sortie de la première cellule mémoire et connecter simultanément le premier nœud d'entrée/sortie de la troisième cellule mémoire à la masse électrique ;
- Chaque cellule mémoire présentant: un premier seuil de tension pour passer d'un état résistif haut à un état résistif bas ; et un second seuil de tension pour passer d'un état résistif bas à un état résistif haut supérieur au premier seuil de tension. Ladite première tension de lecture étant positive avec une amplitude supérieure ou égale au premier seuil de passage et strictement inférieure au second seuil de passage.
- [0021] Selon un aspect particulier de l'invention, la deuxième opération logique est une fonction booléenne NON-OU exclusive.
- [0022] Selon un aspect particulier de l'invention, les moyens de contrôle sont configurés pour réaliser les étapes suivantes, dans l'ordre d'énumération, afin de réaliser la

fonction logique NON-OU exclusive :

- i. Initialiser la quatrième cellule à un état résistif bas ;
- ii. sélectionner la première, la troisième et la quatrième cellule mémoire en mettant à l'état passant leurs transistors ;
- iii. réaliser simultanément :
 - a. l'application d'une deuxième tension de lecture positive sur le premier nœud d'entrée/sortie de la première cellule mémoire ;
 - b. l'application d'une troisième tension de lecture négative sur le premier nœud d'entrée/sortie de la troisième cellule mémoire ;
 - c. et l'application d'une quatrième tension de lecture positive sur le premier nœud d'entrée/sortie de la quatrième cellule mémoire ;
- iv. sélectionner la deuxième, la troisième et la quatrième cellule mémoire en mettant à l'état passant leurs transistors de sélection ;
- v. réaliser simultanément :
 - a. l'application de la deuxième tension de lecture positive sur le premier nœud d'entrée/sortie de la deuxième cellule mémoire ;
 - b. l'application de la troisième tension de lecture négative sur le premier nœud d'entrée/sortie de la troisième cellule mémoire ;
 - c. et l'application d'une quatrième tension de lecture positive sur le premier nœud d'entrée/sortie de la quatrième cellule mémoire ;

La valeur absolue de la troisième tension de lecture étant sensiblement égale à la valeur absolue de la deuxième tension de lecture. La somme de la valeur absolue de la quatrième tension de lecture et de la deuxième tension de lecture étant supérieure au second seuil de passage.

[0023] Selon un aspect particulier de l'invention, la première opération logique est une fonction booléenne ET.

[0024] Selon un aspect particulier de l'invention, le circuit de calcul dans la mémoire comprend en outre pour chaque ligne d'interconnexion un transistor de régulation; chaque transistor de régulation ayant une grille recevant un signal de régulation et reliant la ligne d'interconnexion associée à la masse de manière à réaliser une impédance variable.

[0025] Selon un aspect particulier de l'invention, le circuit de calcul dans la mémoire comprend une pluralité de groupes élémentaires de cellules mémoires. Chaque ligne d'interconnexion étant connectée à une ligne d'interconnexion adjacente par l'intermédiaire d'un interrupteur.

[0026] Selon un aspect particulier de l'invention, les moyens de contrôle sont configurés pour réaliser le transfert d'une donnée stockée d'une cellule mémoire de départ à une cellule mémoire d'arrivée appartenant à un plan différent de celui de la cellule

mémoire de départ et connectée à une ligne d'interconnexion adjacente à celle de la cellule mémoire de départ. Le transfert est réalisé en exécutant, dans l'ordre d'énumération, les étapes suivantes :

i' - initialiser la cellule d'arrivée à un état résistif haut ;

ii' - mettre l'interrupteur à l'état passant ;

iii' - réaliser simultanément :

- a. l'application d'une première tension de transfert positive sur le premier nœud d'entrée/sortie de la cellule mémoire de départ ;
- b. la connexion du premier nœud d'entrée/sortie de la cellule mémoire d'arrivée à la masse électrique ;
- c. l'application d'une seconde tension de transfert positive sur le premier nœud d'entrée/sortie de la cellule mémoire appartenant au même plan de la cellule mémoire de départ et connectée à la même ligne d'interconnexion de la cellule mémoire d'arrivée ;
- d. l'application de la seconde tension de transfert positive sur le premier nœud d'entrée/sortie de la cellule mémoire appartenant au même plan de la cellule mémoire d'arrivée et connectée à la même ligne de données (ou ligne de bits) de la cellule mémoire de départ ;

L'amplitude de la seconde tension de transfert étant inférieure ou égale à la moitié de la première tension de transfert.

[0027] Selon un aspect particulier de l'invention, pour chaque groupe élémentaire de cellules mémoires, la ligne d'interconnexion connecte l'un à l'autre les premiers nœuds d'entrée/sortie des cellules mémoire dudit groupe élémentaire.

[0028] On entend par « ligne d'interconnexion commune », une ligne conductrice connectant les mêmes nœuds d'une pluralité de cellules mémoire réparties sur au moins deux plans mémoires. La connexion est réalisée d'une manière directe et sans intermédiaire. Selon un aspect particulier de l'invention, la ligne d'interconnexion commune correspond à la ligne de données commune (bit line en anglais). Selon un aspect particulier de l'invention, la ligne d'interconnexion commune correspond à la ligne de sources commune (source line en anglais).

[0029] Selon un aspect particulier de l'invention, le circuit en mémoire comprend une pluralité de plans mémoire de rang i allant de 1 à N , avec N un entier supérieur ou égal à 2.

Description détaillée

[0030] D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront mieux à la lecture de la description qui suit en relation aux dessins annexés suivants.

[0031] [Fig.1a] la [Fig.1a] illustre une vue en coupe d'une structure de stockage résistive

programmable.

- [0032] [Fig.1b] la [Fig.1b] illustre une cellule mémoire utilisée pour réaliser le circuit de calcul en mémoire selon l'invention.
- [0033] [Fig.2a] la [Fig.2a] illustre un groupe élémentaire de cellules mémoires selon un premier mode de réalisation de l'invention destiné à réaliser l'opération logique A OU B.
- [0034] [Fig.2b] la [Fig.2b] illustre les étapes pour réaliser l'opération logique A OU B avec le groupe élémentaire de cellules mémoires selon le premier mode de réalisation l'invention.
- [0035] [Fig.3a] la [Fig.3a] illustre un groupe élémentaire de cellules mémoires selon un second mode de réalisation de l'invention destiné à réaliser l'opération logique A XNOR B.
- [0036] [Fig.3b] la [Fig.3b] illustre les étapes pour réaliser l'opération logique A XNOR B avec le groupe élémentaire de cellules mémoires selon le deuxième mode de réalisation de l'invention.
- [0037] [Fig.4] la [Fig.4] illustre les étapes pour réaliser l'opération logique A ET B avec le groupe élémentaire de cellules mémoires selon le premier mode de réalisation de l'invention.
- [0038] [Fig.5a] la [Fig.5a] illustre un premier mode de réalisation du circuit de calcul dans la mémoire selon l'invention.
- [0039] [Fig.5b] la [Fig.5b] illustre une vue en coupe de la structure en couches minces d'une colonne du circuit de calcul dans la mémoire selon l'invention.
- [0040] [Fig.5c] la [Fig.5c] illustre un deuxième mode de réalisation du circuit de calcul dans la mémoire selon l'invention.
- [0041] [Fig.6a] la [Fig.6a] illustre un troisième mode de réalisation du circuit de calcul dans la mémoire selon l'invention.
- [0042] [Fig.6b] la [Fig.6b] illustre un groupe élémentaire de cellules mémoires selon un quatrième mode de réalisation de l'invention destiné à réaliser un transfert de données.
- [0043] [Fig.6c] la [Fig.6c] illustre les étapes pour réaliser un transfert de données avec le groupe élémentaire de cellules mémoires selon le quatrième mode de réalisation l'invention.
- [0044] [Fig.7] la [Fig.7] illustre les étapes exécutées par le circuit de calcul selon l'invention pour calculer le produit au sens des hypervecteurs de trois vecteurs de données.
- [0045] [Fig.8] la [Fig.8] illustre un groupe élémentaire de cellules mémoires selon un troisième mode de réalisation de l'invention destiné à réaliser l'opération logique A OU B.
- [0046] Nous allons commencer par décrire le principe de fonctionnement d'une structure de stockage de données résistive programmable. La [Fig.1a] illustre une vue en coupe

d'une structure de stockage résistive programmable. La structure de stockage S1 se compose de l'empilement de couches minces selon l'ordre suivant : au moins une première couche C1 en un matériau électriquement conducteur formant une électrode inférieure EL2 ; une deuxième couche C2 en un matériau diélectrique et au moins une troisième couche C3 en matériau électriquement conducteur formant une électrode supérieure EL1. Les caractéristiques des matériaux constituant les couches de structure mémoire NVM permettent d'obtenir un fonctionnement en mémoire résistive à filament conducteur variable. On dénomme la deuxième couche C2 dans la suite de la description la « couche centrale ».

- [0047] Alternativement, il est possible de réaliser chaque électrode EL1 et/ou EL2 par un empilement de plusieurs couches conductrices.
- [0048] À titre d'exemple et sans perte de généralité, la première couche C1 (et donc l'électrode inférieure EL2) et la troisième couche C3 (et donc l'électrode supérieure EL1) sont réalisées en nitrure de titane TiN. L'épaisseur de chacune des couches C1(EL2) et C3 (EL1) est de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres, plus particulièrement égale à 100nm.
- [0049] À titre d'exemple et sans perte de généralité, la couche centrale C2 est réalisée en oxyde d'hafnium. L'épaisseur de la couche centrale C2 est de l'ordre de quelques nanomètres, plus particulièrement égale à 10nm.
- [0050] Le fonctionnement d'une structure de stockage S1 résistive nécessite la formation d'un filament conducteur à travers au moins une partie de la couche centrale C2, isolante électriquement.
- [0051] Initialement, le structure de stockage S1 est une structure de type MIM (métal, isolant, métal) présentant une résistance infinie entre les deux électrodes EL1 et EL2. D'abord, il faut former le filament F à travers au moins une partie du volume de la couche centrale C2. La formation du filament permet d'obtenir une résistance variable en modulant la longueur l du filament conducteur formé. Pour former le filament, on applique une tension électrique positive de formation sur l'électrode supérieure EL1. La tension électrique de formation présente une amplitude et/ou une durée suffisamment élevée afin d'entraîner la génération de lacunes d'oxygène dans la couche centrale C2. En effet, la tension électrique de formation appliquée doit dépasser une valeur prédéterminée de manière à arracher des ions oxygène du réseau cristallin de la couche centrale en oxyde métallique. Les ions vont merger vers l'électrode supérieure EL2 pour former un filament conducteur F à travers la couche centrale constitué des lacunes d'oxygène.
- [0052] Une fois le filament conducteur F formé, on obtient le comportement d'élément résistif à une résistance variable R selon la longueur du filament conducteur F. Lorsque le potentiel électrique de l'électrode supérieure V_{EL1} est inférieur à celui de l'électrode

inférieure V_{EL2} , la structure de stockage S1 voit une tension V_{reset} négative à ses bornes. Dans ce cas, des ions oxygènes vont venir combler une partie des lacunes d'oxygène formant le filament conducteur. Il en résulte une réduction de la longueur du filament conducteur. Ainsi, la résistance de l'élément résistif augmente. On parle d'un état résistif haut et d'une opération d'écriture de type RESET. Inversement, lorsque le potentiel électrique de l'électrode supérieure V_{EL1} est supérieur à celui de l'électrode inférieure V_{EL2} , la structure de stockage S1 voit une tension V_{set} positive à ses bornes. La longueur du filament conducteur F s'accroît par le même mécanisme décrit pour l'opération de formation du fil. Ainsi, la résistance de l'élément résistif diminue. On parle d'un état résistif bas et d'une opération d'écriture de type SET.

- [0053] La tension appliquée V_{set} doit être supérieure en valeur absolue à un premier seuil de tension pour passer d'un état résistif haut à un état résistif bas. De même, la tension appliquée V_{reset} doit être supérieure en valeur absolue à un second seuil de tension pour passer d'un état résistif bas à un état résistif haut.
- [0054] On choisit la convention suivante à titre d'exemple : lorsque la structure de stockage S1 est configurée pour stocker une donnée binaire à l'état logique haut ($x=1$) elle est à un état résistif bas. Inversement, lorsque la structure de stockage S1 est configurée pour stocker une donnée binaire à l'état logique bas ($x=0$) elle est à un état résistif haut. Une convention inverse est aussi possible.
- [0055] La [Fig.1b] illustre un schéma électrique d'une cellule mémoire CM selon l'invention. La cellule mémoire CM comprend une structure mémoire S1 et un transistor de sélection T1. La cellule mémoire CM comprend en outre un nœud de sélection WL, un premier nœud d'entrée/sortie SL et un second nœud d'entrée/sortie BL. L'électrode supérieure EL1 de la structure de stockage S1 est connectée au second nœud d'entrée/sortie BL de la cellule mémoire CM. Le nœud de sélection WL est destiné à recevoir un signal de sélection VWL. La grille du transistor T1 est connectée au nœud de sélection WL. Le transistor T2 est monté de manière à relier l'électrode inférieure EL2 au premier nœud d'entrée/sortie SL. Ainsi, la cellule mémoire CM ne peut être écrite en SET ou en RESET que lorsque le transistor T1 est à l'état passant. De plus, le transistor T1 permet de limiter le courant passant à travers la structure de stockage S1 lors d'une opération de SET. La limitation de courant protège la structure S1 du risque de destruction structurelle interne due à la présence des courants forts potentiels lors de la transition d'un état résistif haut à un état résistif bas.
- [0056] Généralement, il est possible de réaliser dans le cadre de l'invention des cellules mémoires de types OxRAM, CbRAM ou toute autre technologie de mémoire résistive non-volatile.
- [0057] D'une manière générale, l'invention concerne un circuit de calcul dans la mémoire comprenant une pluralité de plans mémoire de rangs i de 1 à N, avec N un entier

naturel supérieur à 1. Chaque plan forme une matrice bidimensionnelle de cellules mémoire CM telles que décrites précédemment. Chaque matrice comprend M lignes et K colonnes de cellules mémoires. On obtient ainsi une structure de mémoires tridimensionnelle. La structure de mémoire tridimensionnelle selon l'invention est caractérisée par l'implémentation d'au moins un groupe élémentaire de plusieurs cellules mémoires aptes à réaliser au moins une opération logique. Nous allons dans ce qui suit décrire plusieurs exemples non limitatifs de modes de réalisation de groupes élémentaires de cellules mémoires.

[0058] La [Fig.2a] illustre un groupe élémentaire de cellules mémoires selon un premier mode de réalisation de l'invention destiné à réaliser l'opération logique A OU B. Le groupe élémentaire est composé de trois cellules mémoire CM_A , CM_B , CM_{OR} . La première cellule mémoire CM_A appartient au plan mémoire P_{in1} et elle est destinée à stocker une première donnée d'entrée A. La deuxième cellule mémoire CM_B appartient au plan mémoire P_{in1} et elle est destinée à stocker une deuxième donnée d'entrée B. La troisième cellule mémoire CM_{OR} appartient à un plan mémoire P_{OR1} différent du plan mémoire P_{in1} . La troisième cellule mémoire est destinée à stocker le résultat de l'opération logique A OU B.

[0059] Dans l'exemple illustré, chacun des plans mémoire P_{in1} et P_{OR1} est une matrice de cellules mémoires de quatre lignes (L_1, L_2, L_3, L_4) et de deux colonnes (C_1, C_2). Dans chaque plan mémoire :

- les nœuds de sélection WL des cellules mémoires appartenants à la même ligne L_j sont interconnectés par une ligne de sélection WL_{ij} ;
- les premiers nœuds d'entrée/sorties SL des cellules mémoires appartenants à la même colonne C_k sont interconnectés à travers une ligne de source commune (source line en anglais) ;
- les seconds nœuds d'entrée/sorties BL des cellules mémoires appartenants à la même colonne C_k sont interconnectés par une ligne de données commune (bit line en anglais).

[0060] Ainsi, chaque plan mémoire comprend M lignes de sélection WL_{ij} (M étant le nombre de ligne par plan), K lignes de source et K lignes de données (K étant le nombre de colonnes par plan).

[0061] Dans le groupe élémentaire illustré, la première cellule mémoire CM_A , la deuxième cellule mémoire CM_B et la troisième cellule mémoire CM_{OR} appartiennent toutes à des colonnes de même rang k dans leurs matrices respectives. Les seconds nœuds d'entrée/sortie BL de la première, de la deuxième et des troisièmes cellules mémoire CM_A , CM_B et CM_{OR} sont interconnectés par une ligne d'interconnexion commune BL_{1a} . La ligne d'interconnexion commune correspond dans ce cas à la ligne de données (bit line en anglais) des cellules mémoire CM_A , CM_B et CM_{OR} . Ce montage spécifique

combiné avec l'application d'une séquence de tension bien déterminée sur les nœuds desdites cellules permet de réaliser la fonction logique A OU B dans la troisième cellule.

- [0062] Alternativement, il est possible d'implémenter les deux cellules d'entrée CM_A et CM_B dans deux plans mémoires distincts, à condition qu'ils appartiennent à des colonnes de même rang k .
- [0063] Ainsi, le groupe élémentaire est commandé via les nœuds suivants : le premier nœud d'entrée/sortie commun à CM_A et CM_B noté SL_{1a} , le premier nœud d'entrée/sortie de CM_{OR} noté SL_{2a} et les trois nœuds de sélection ($WL_{1,1}, WL_{1,2}, WL_{2,1}$).
- [0064] Avantagusement, il est possible de réaliser un autre groupe élémentaire de cellules mémoires symétrique sur les deuxièmes colonnes C_2 des plans P_{in1} et P_{OR1} . Cela permet de réaliser deux opérations logiques OU sur deux couples d'opérandes différents de manière parallèle.
- [0065] La [Fig.2b] illustre les étapes pour réaliser l'opération logique A OU B avec le groupe élémentaire de cellules mémoires selon le premier mode de réalisation de l'invention.
- [0066] La première étape 100 consiste à initialiser la troisième cellule CM_{OR} à un état résistif haut correspondant à un état logique bas $x=0$.
- [0067] Ensuite, un premier cycle de calcul 200 est déclenché. Le cycle 200 comprend une première étape 201 consistant à sélectionner la première cellule mémoire CM_A et la troisième cellule mémoire CM_{OR} en mettant à l'état passant leurs transistors de sélection T1. La seconde étape 202 du cycle 200 consiste à appliquer une première tension de lecture positive sur le premier nœud d'entrée/sortie SL_{1a} de la première cellule mémoire et connecter simultanément le premier nœud d'entrée/sortie SL_{2a} de la troisième cellule mémoire à la masse électrique.
- [0068] L'amplitude de la première tension de lecture positive appliquée sur le nœud SL_{1a} est strictement inférieure au second seuil de tension V_{reset} pour passer d'un état résistif bas à un état résistif haut. Cela assure la préservation de l'état résistif de la première cellule mémoire CM_A contenant la première donnée d'entrée. Deux cas de figures sont possibles pour cette configuration :
- [0069] Dans le premier cas, on considère que la première cellule CM_A est à un état résistif bas ($A=1$). Cela induit que la chute de tension à travers ladite cellule mémoire est faible. La première cellule mémoire CM_A est assimilable à un interrupteur à l'état passant. La tension appliquée est propagée vers le second nœud d'entrée /sortie BL de la troisième cellule mémoire CM_{OR} par l'intermédiaire de la ligne d'interconnexion commune BL_{1a} . Ainsi, la troisième cellule mémoire CM_{OR} se retrouve avec une tension positive sur l'électrode supérieure EL1 connectée à la ligne d'interconnexion BL_{1a} , et une tension nulle sur l'électrode inférieure EL2 connectée à la masse à travers le

transistor T1 associé à l'état passant. La troisième cellule mémoire CM_{OR} est soumise ainsi à une tension positive à ses bornes. L'amplitude de la première tension de lecture positive appliquée sur le noeud SL_{1a} est strictement supérieure au premier seuil de tension V_{set} pour passer d'un état résistif haut à un état résistif bas. Ainsi, la troisième cellule mémoire CM_{OR} passe d'un état résistif haut ($x=0$) à un état résistif bas ($x=1$) lorsque ($A=1$).

[0070] A titre d'exemple, pour une technologie de mémoire résistive déterminée, le premier seuil de tension V_{set} est égale à 1,5V et le deuxième seuil de tension V_{reset} est égal à 2V. L'amplitude de la première tension de lecture positive appliquée sur le noeud SL_{1a} est égale à 1.8V. La première tension de lecture VSL_{1a} est sous forme d'impulsion rectangulaire avec une durée de 100ns à titre d'exemple.

[0071] Dans le second cas, on considère que la première cellule CM_A est à un état résistif haut ($A=0$). Cela induit que la chute de tension à travers ladite cellule mémoire est forte. La première cellule mémoire CM_A est assimilable à un interrupteur à l'état bloquant. La troisième cellule mémoire CM_{OR} se retrouve avec une tension positive proche de zéro sur l'électrode supérieure EL1 et une tension nulle sur l'électrode inférieure EL2 connectée à la masse à travers le transistor T1 associé à l'état passant. La troisième cellule mémoire CM_{OR} est soumise ainsi à une tension faible à ses bornes et non suffisante pour provoquer un changement d'état résistif. Ainsi, la troisième cellule mémoire CM_{OR} reste à son état résistif initialement haut ($x=0$) lorsque ($A=0$).

[0072] Ensuite, un second cycle de calcul 300 est déclenché. Le cycle 300 comprend une première étape 301 consistant à sélectionner la deuxième cellule mémoire CM_B et la troisième cellule mémoire CM_{OR} en mettant à l'état passant leurs transistors de sélection T1. La seconde étape 302 du cycle 300 consiste à appliquer la première tension de lecture positive sur le premier nœud d'entrée/sortie SL_{1a} de la deuxième cellule mémoire et connecter simultanément le premier nœud d'entrée/sortie SL_{2a} de la troisième cellule mémoire à la masse électrique. Il s'agit d'une répétition du cycle 200 mais en sélectionnant la deuxième cellule mémoire CM_B contenant la seconde donnée d'entrée B. Ainsi, par le même mécanisme décrit dans le premier cycle 200, si la deuxième cellule mémoire CM_B est à un état résistif bas ($B=1$), alors la troisième cellule mémoire CM_{OR} passe à un état résistif bas ($x=1$). Si la deuxième cellule mémoire CM_B est à un état résistif haut ($B=0$), alors la troisième cellule mémoire CM_{OR} reste à un état résistif haut ($x=0$).

[0073] On obtient ainsi, par la séquence d'étapes précédente, la fonction logique suivante : la troisième cellule mémoire CM_{OR} reste à un état résistif haut ($x=0$) si et seulement si la première et la deuxième cellule mémoire CM_B, CM_A sont toutes les deux à un état résistif haut. ($A=0$ et $B=0$). Cela correspond à la fonction logique A OU B comme illustré dans la table logique de la [Fig.2b].

- [0074] La [Fig.3a] illustre un groupe élémentaire de cellules mémoires selon un second mode de réalisation de l'invention destiné à réaliser l'opération logique $A \text{ XNOR } B$. Le deuxième mode de réalisation reprend la même structure du groupe élémentaire selon le premier mode de réalisation et comprend en outre une quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} . La quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} appartient à un plan mémoire P_{XNOR1} différent de celui des plans mémoire P_{in1} et P_{OR1} . La quatrième cellule mémoire est destinée à stocker le résultat de la fonction logique $(A \text{ XNOR } B)$. La première donnée d'entrée A stockée dans CM_A , la deuxième donnée d'entrée B stockée dans CM_B et le résultat de $(A \text{ OR } B)$ préalablement calculé et stocké dans CM_{OR} sont utilisées pour calculer $A \text{ XNOR } B$ dans CM_{XNOR} .
- [0075] Le second nœud d'entrée/sortie BL de la quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} est connecté aux seconds nœuds d'entrée/sortie BL de la première, de la deuxième et de la troisième cellule mémoire CM_A , CM_B et CM_{OR} par l'intermédiaire de la ligne d'interconnexion commune BL_{1a} .
- [0076] La quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} appartient à la colonne C_1 dans la matrice du plan P_{XNOR1} . Il s'agit de la colonne de même rang que les cellules mémoires CM_A , CM_B et CM_{OR} . Cela permet de simplifier l'interconnexion entre les seconds nœuds d'entrée/sortie BL dédiés cellules mémoires à travers la ligne d'interconnexion BL_{1a} .
- [0077] Le groupe élémentaire de cellules mémoires selon le second mode de réalisation de l'invention est configurable via : le premier nœud d'entrée/sortie commun à CM_A et CM_B noté SL_{1a} , le premier nœud d'entrée/sortie de CM_{OR} noté SL_{2a} , le premier nœud d'entrée/sortie de CM_{XNOR} noté SL_{3a} et les quatre nœuds de sélection ($WL_{1,1}$, $WL_{1,2}$, $WL_{2,1}$, $WL_{3,1}$).
- [0078] Avantageusement, il est possible de réaliser un autre groupe élémentaire de cellules mémoires symétrique sur les deuxièmes colonnes C_2 des plans P_{in1} et P_{OR1} . Cela permet de réaliser deux opérations logiques OU sur deux couples d'opérandes différents d'une manière parallèle.
- [0079] La [Fig.3b] illustre les étapes pour réaliser l'opération logique $(A \text{ XNOR } B)$ avec le groupe élémentaire de cellules mémoires selon le deuxième mode de réalisation l'invention. Pour réaliser ce calcul le résultat de l'opération logique $(A \text{ OR } B)$ doit être préalablement calculé et stocké dans la troisième cellule mémoire CM_{OR} . Pour cela il est envisageable d'exécuter les étapes du procédé décrit pour le groupe élémentaire selon le premier mode de réalisation de l'invention décrit précédemment. Il est aussi envisageable d'écrire la valeur de l'opération logique $(A \text{ OR } B)$ dans la troisième cellule mémoire CM_{OR} à partir d'un calculateur externe.
- [0080] La première étape 400 consiste à initialiser la quatrième cellule CM_{XNOR} à un état résistif bas correspondant à un état logique haut $x=1$.
- [0081] Ensuite, un premier cycle de calcul 500 est déclenché. Le cycle 500 comprend une

première étape 501 consistant à sélectionner la première cellule mémoire CM_A , la troisième cellule mémoire CM_{OR} et la quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} en mettant à l'état passant leurs transistors de sélection T1. La seconde étape 502 du cycle 500 consiste à réaliser simultanément :

- [0082] l'application d'une deuxième tension de lecture positive VSL_{1a} sur le premier nœud d'entrée/sortie SL_{1a} de la première cellule mémoire CM_A ;
- [0083] l'application d'une troisième tension de lecture négative VSL_{2a} sur le premier nœud d'entrée/sortie SL_{2a} de la troisième cellule mémoire CM_{OR} ;
- [0084] et l'application d'une quatrième tension de lecture positive VSL_{3a} sur le premier nœud d'entrée/sortie SL_{3a} de la quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} ;
- [0085] La valeur absolue de la deuxième tension de lecture positive VSL_{1a} est sensiblement égale à celle de la troisième tension de lecture négative VSL_{2a} . Avantagusement, la valeur absolue de la deuxième tension de lecture positive VSL_{1a} est légèrement supérieure à celle de la troisième tension de lecture négative VSL_{2a} . La différence en valeur absolue entre VSL_{1a} et VSL_{2a} est comprise entre 0% et 40% de la valeur absolue de la troisième tension de lecture VSL_{2a} . Plus particulièrement, la différence en valeur absolue entre VSL_{1a} et VSL_{2a} est comprise entre 25% et 35% de la valeur absolue de la troisième tension de lecture VSL_{2a} . D'autre part, l'amplitude quatrième tension de lecture positive VSL_{3a} est strictement inférieure au second seuil de tension V_{reset} pour passer d'un état résistif bas à un état résistif haut. Trois cas sont possibles pour cette configuration :
- [0086] Dans le premier cas, on considère que la première cellule CM_A est à un état résistif bas ($A=1$) et la troisième cellule CM_{OR} est à un état résistif bas ($A \text{ OR } B=1$). La première cellule mémoire CM_A est assimilable à un interrupteur à l'état passant. La deuxième tension de lecture positive VSL_{1a} est propagée vers le second nœud d'entrée /sortie BL de la quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} par l'intermédiaire de la ligne d'interconnexion commune BL_{1a} . De même, la troisième cellule mémoire CM_{OR} est assimilable à un interrupteur à l'état passant. La troisième tension de lecture négative VSL_{2a} est propagée vers le second nœud d'entrée /sortie BL de la quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} par l'intermédiaire de la ligne d'interconnexion commune BL_{1a} . Par application de la loi des mailles, le nœud BL de la quatrième cellule CM_{XNOR} présente un potentiel égal à la somme algébrique de VSL_{2a} et VSL_{1a} qui de quelques mV. On obtient ainsi l'équation suivante :

$$VBL_{1a} = VSL_{1a} + VSL_{2a} \approx 0V$$
Ainsi, la quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} voit la tension suivante à ces bornes :

$$V_{XNOR} = VBL_{1a} - VSL_{3a} = (VSL_{1a} + VSL_{2a}) - VSL_{3a} \approx -VSL_{3a} < 0 ;$$

$$\text{avec } |VSL_{3a}| < V_{RESET}$$

La quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} est soumise ainsi à une tension V_{XNOR} négative à ses bornes. L'amplitude de la tension négative V_{XNOR} n'est pas suffisamment élevée pour dépasser le second seuil de tension V_{reset} pour passer d'un état résistif bas à un état résistif haut. Ainsi, la quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} reste à un état résistif bas ($x=1$) lorsque ($A=1$) et ($A \text{ OR } B=1$).

[0087] Dans le second cas, on considère que la première cellule CM_A est à un état résistif haut ($A=0$) et la troisième cellule CM_{OR} est à un état résistif haut ($A \text{ OR } B=0$). Aucune des tensions de lecture VSL_{2a} et VSL_{1a} n'est propagée au nœud BL de la quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} . La quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} reste ainsi à son état résistif initial. La quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} reste à un état résistif bas ($x=1$) lorsque ($A=0$) et ($A \text{ OR } B=0$).

[0088] Dans le troisième cas, on considère que la première cellule CM_A est à un état résistif haut ($A=0$) et la troisième cellule CM_{OR} est à un état résistif bas ($A \text{ OR } B=1$). La première cellule mémoire CM_A est assimilable à un interrupteur à l'état bloquant. La deuxième tension de lecture positive VSL_{1a} n'est pas propagée vers le second nœud d'entrée /sortie BL de la quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} . De même, la troisième cellule mémoire CM_{OR} est assimilable à un interrupteur à l'état passant. La troisième tension de lecture négative VSL_{2a} est propagée vers le second nœud d'entrée /sortie BL de la quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} par l'intermédiaire de la ligne d'interconnexion commune BL_{1a} . On obtient ainsi l'équation suivante :

$VBL_{1a} = VSL_{2a} < 0V$ Ainsi, la quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} voit la tension suivante à ces bornes :

$$V_{XNOR} = VBL_{1a} - VSL_{3a} = VSL_{2a} - VSL_{3a} < 0 ;$$

$$\text{avec } |V_{XNOR}| = |VSL_{2a}| + |VSL_{3a}| > V_{RESET}$$

La troisième cellule mémoire CM_{OR} est soumise ainsi à une tension V_{XNOR} négative à ses bornes. L'amplitude de la tension négative V_{XNOR} est suffisamment élevée pour dépasser le second seuil de tension V_{reset} . Ainsi, la quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} passe d'un état résistif bas à un état résistif haut ($x=0$) lorsque ($A=0$) et ($A \text{ OR } B=1$).

[0089] Ensuite, un deuxième cycle de calcul 600 est déclenché. Le cycle 600 est une ré-itération du cycle 500 mais en sélectionnant la deuxième cellule mémoire CM_B contenant la seconde donnée d'entrée B à la place de la première cellule mémoire CM_A . Ainsi, par le même mécanisme décrit dans le premier cycle 600, on obtient les trois cas suivants : la quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} passe d'un état résistif bas à un état résistif haut ($x=0$) lorsque ($B=0$) et ($A \text{ OR } B=1$), sinon la quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} reste à un état résistif bas ($x=1$).

[0090] On obtient ainsi, par la séquence d'étapes précédente, la fonction logique suivante : la quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} passe à un état résistif bas ($x=1$) si et seulement si la première et la deuxième cellule mémoire CM_B, CM_A présentent des états résistifs

opposés ($A=0$ et $B=1$ ou $A=1$ et $B=0$). Cela correspond à la fonction logique $A \text{ XNOR } B$ comme illustré dans la table logique de la [Fig.3b].

[0091] A titre d'exemple, pour une technologie de mémoire résistive déterminée, le premier seuil de tension V_{set} est égale à 1,8V et le deuxième seuil de tension V_{reset} est égal à 2V. La deuxième tension de lecture VSL_{1a} est égale à 1V. La troisième tension de lecture VSL_{2a} est égale à -0,75V. La quatrième tension de lecture VSL_{3a} est égale à 1,5V. Les tensions de lecture VSL_{1a} , VSL_{2a} et VSL_{3a} sont sous forme d'impulsions rectangulaires avec une durée de 100ns à titre d'exemple.

[0092] Avantageusement, la tension de sélection $VWL_{3,1}$ appliquée sur la grille du transistor T1 de la quatrième cellule mémoire CM_{XNOR} est inférieure à la tension d'alimentation générale VDD. Cela permet de limiter le courant à travers la cellule mémoire lors d'une transition. Ainsi, on protège la cellule mémoire du risque de détérioration due à la présence des courants forts lors d'une modification de son état résistif.

[0093] De plus, il est possible de réaliser la fonction logique ($A \text{ ET } B$) en utilisant le groupe élémentaire de cellules mémoires selon le premier mode de réalisation. La [Fig.4] illustre les étapes pour réaliser l'opération logique ($A \text{ ET } B$) avec le groupe élémentaire de cellules mémoires selon le premier mode de réalisation l'invention. Dans cette illustration, la troisième cellule mémoire est destinée à stocker le résultat de l'opération logique ($A \text{ ET } B$) et elle est dénommée C_{AND} au lieu de C_{OR} . La connexion entre les trois cellules mémoires reste inchangée par rapport à la [Fig.2a].

[0094] La première étape 100' consiste à initialiser la troisième cellule CM_{AND} à un état résistif bas correspondant à un état logique haut $x=1$.

[0095] Ensuite, un premier cycle de calcul 200' est déclenché. Le cycle 200' comprend une première étape 201' consistant à sélectionner la première cellule mémoire CM_A et la troisième cellule mémoire CM_{AND} en mettant à l'état passant leurs transistors de sélection T1. La seconde étape 202' du cycle 200 consiste à appliquer une première tension de lecture VSL_{1a} positive sur le premier nœud d'entrée/sortie SL_{1a} de la première cellule mémoire et appliquer une deuxième tension de lecture VSL_{2a} positive sur le troisième nœud d'entrée/sortie SL_{2a} de la troisième cellule mémoire CM_{AND} .

[0096] L'amplitude de la première tension de lecture VSL_{1a} est strictement inférieure au second seuil de tension V_{reset} pour passer d'un état résistif bas à un état résistif haut. Cela assure la préservation de l'état résistif de la première cellule mémoire CM_A contenant la première donnée d'entrée. L'amplitude de la deuxième tension de lecture VSL_{2a} est strictement supérieure au second seuil de tension V_{reset} pour passer d'un état résistif bas à un état résistif haut. Deux cas de figures sont possibles pour cette configuration :

[0097] Dans le premier cas, on considère que la première cellule CM_A est à un état résistif bas ($A=1$). Cela induit que la chute de tension à travers ladite cellule mémoire est

faible. La première cellule mémoire CM_A est assimilable à un interrupteur à l'état passant. La tension appliquée est propagée vers le second nœud d'entrée /sortie BL de la troisième cellule mémoire CM_{AND} par l'intermédiaire de la ligne d'interconnexion commune BL_{1a} . Ainsi, la troisième cellule mémoire CM_{AND} voit la tension suivante à ces bornes :

$$V_{AND} = VBL_{1a} - VSL_{2a} \approx VSL_{1a} - VSL_{2a} < 0 ; \text{ avec } |V_{AND}| < V_{RESET}$$

[0098] La troisième cellule mémoire CM_{AND} est soumise ainsi à une tension V_{AND} négative à ses bornes. L'amplitude de la tension négative V_{AND} n'est pas suffisamment élevée pour dépasser le second seuil de tension V_{reset} et passer d'un état résistif bas à un état résistif haut. Ainsi, la troisième cellule mémoire CM_{AND} reste à un état résistif bas ($x=1$) lorsque ($A=1$).

[0099] Dans le second cas, on considère que la première cellule CM_A est à un état résistif haut ($A=0$). Cela induit que la chute de tension à travers ladite cellule mémoire est forte. La première cellule mémoire CM_A est assimilable à un interrupteur à l'état bloquant. Le second nœud d'entrée /sortie BL de la troisième cellule mémoire CM_{AND} une tension V_{BL1a} positive proche de zéro. Ainsi, la troisième cellule mémoire CM_{AND} voit la tension suivante à ces bornes :

$$V_{AND} = VBL_{1a} - VSL_{2a} \approx 0 - VSL_{2a} < 0 ; \text{ avec } |V_{AND}| > V_{RESET} \text{ car } VBL_{1a} \approx 0$$

[0100] La troisième cellule mémoire CM_{AND} est soumise ainsi à une tension V_{AND} négative à ses bornes. L'amplitude de la tension négative V_{AND} est suffisamment élevée pour dépasser le second seuil de tension V_{reset} . Ainsi, la troisième cellule mémoire CM_{AND} passe à un état résistif haut ($x=0$) lorsque ($A=0$).

[0101] Ensuite, un deuxième cycle de calcul 300' est déclenché. Le cycle 300' est une ré-itération du cycle 200' mais en sélectionnant la deuxième cellule mémoire CM_B contenant la seconde donnée d'entrée B à la place de la première cellule mémoire CM_A . Ainsi, par le même mécanisme décrit dans le premier cycle 200', on obtient les deux cas suivants : la troisième cellule mémoire CM_{AND} passe d'un état résistif bas à un état résistif haut ($x=0$) lorsque ($B=0$), sinon la troisième cellule mémoire CM_{AND} reste à un état résistif bas ($x=1$).

[0102] On obtient ainsi, par la séquence d'étapes précédente, la fonction logique suivante : la troisième cellule mémoire CM_{AND} reste à un état résistif bas ($x=1$) si et seulement si la première et la deuxième cellule mémoire CM_B, CM_A sont toutes les deux à un état résistif bas. ($A=1$ et $B=1$). Cela correspond à la fonction logique A ET B comme illustré dans la table logique de la [Fig.4].

[0103] La [Fig.5a] illustre un premier mode de réalisation du circuit de calcul dans la mémoire 10 selon l'invention. Le circuit de calcul 10 comprend une pluralité de plans

mémoire successifs P_i derangs i de 1 à N , avec N un entier naturel supérieur à 1.

Chaque plan mémoire forme une matrice bidimensionnelle de cellules mémoire CM selon l'invention. Chaque matrice comprend M lignes L_j et K colonnes C_k . À titre d'exemple illustratif, le nombre de lignes par matrice est égal à 4.

- [0104] Dans chaque plan mémoire P_i , les nœuds de sélection WL des cellules mémoires appartenant à la même ligne L_j sont interconnectés par une ligne de sélection WL_{ij} commune.
- [0105] Dans chaque plan mémoire P_i , les premiers nœuds d'entrée/sorties SL des cellules mémoires appartenant à la même colonne C_k sont interconnectés. De plus, les premiers nœuds d'entrée/sortie SL des cellules mémoire appartenant aux colonnes C_k de rangs impairs sont interconnectés formant une première ligne de source SL_{ia} avec i de 1 à N . De plus, les premiers nœuds d'entrée/sortie SL des cellules mémoire appartenant aux colonnes C_k de rangs pairs sont interconnectés formant une seconde ligne de source SL_{ib} avec i de 1 à N .
- [0106] Dans chaque plan mémoire P_i , les seconds nœuds d'entrée/sorties BL des cellules mémoires appartenant à la même colonne C_k sont interconnectés. Les cellules mémoires appartenant à des colonnes de même rangs à travers tous les plans mémoire P_i forment un plan parallèle au plan géométrique (X,Z) . Les seconds nœuds d'entrée/sorties BL appartenant à un même plan (X,Z) , sont interconnectés par l'intermédiaire d'une ligne d'interconnexion commune. À titre d'exemple, les cellules mémoire des colonnes de rang 1 de tous les plans mémoire sont interconnectés via la ligne d'interconnexion BL_{1a} . Les cellules mémoire des colonnes de rang 2 de tous les plans mémoire sont interconnectées via la ligne d'interconnexion BL_{1b} .
- [0107] On obtient ainsi une structure tridimensionnelle de mémoires non-volatile comprenant une pluralité de groupes élémentaires selon l'invention aptes à réaliser des opérations logiques de type OU, ET et toute autre opération logique réalisable à partir des opérations élémentaires OU et ET.
- [0108] Avantagusement, il est envisageable de dédier un plan P_i pour stocker les opérandes d'entrée. Il est envisageable de dédier un plan P_i quelconque de la structure pour stocker les résultats d'une opération logique mettant en œuvre les différentes combinaisons des opérandes d'entrée. Cela offre une flexibilité de programmation que les structures usuelles de circuit de calcul en mémoire ne présentent pas.
- [0109] D'une manière générale, le circuit de calcul 10 selon l'invention présente l'avantage suivant : Toutes les cellules d'un même plan (XZ) ont la même ligne d'interconnexion commune BL_{ia} . Ainsi, n'importe quelle cellule mémoire CM de ce plan (XZ) peut être utilisée pour stocker un opérande. Le résultat peut être stocké dans n'importe quelle autre cellule mémoire du plan (XZ) , à l'exception des colonnes comprenant les données d'entrée. Cela laisse une grande liberté de programmation et de stockage des

données dans le circuit de calcul 10.

[0110] De plus, lorsqu'une opération logique est réalisée en parallèle sur tous les plans (XZ), n'importe quelle cellule mémoire peut être ouverte ou fermée grâce à un nœud de sélection indépendant WL_{ij} . Les lignes de sélection WL_{ij} sont indépendantes à l'intérieur d'un même plan (XZ), toutes les cellules inutilisées pendant une opération logique seront fermées. Cela permet de limiter les courants de fuite dans les colonnes de rang j à travers tous les plans mémoire P_i . A titre d'exemple, les transistors T1 sont de type grille enrobante (Gate-All-Around en anglais) si les cellules mémoires sont de type OxRAM. Cela limite les courants de fuite par cellule mémoire CM à 10^{-11} A. Il est alors possible d'implémenter à l'intérieur d'un même plan (XZ) 10^7 cellules mémoires. Il en résulte une augmentation considérable des capacités de stockage et de calcul immergé dans la structure mémoire par rapport aux solutions de l'état de l'art.

[0111] La [Fig.5b] illustre une vue en coupe d'un mode de réalisation de la structure en couches minces d'une colonne C_k de quatre cellules mémoires CM du circuit de calcul dans la mémoire 10 selon l'invention. Les matériaux utilisés sont présentés à titre d'illustration non limitatif.

[0112] La colonne C_k comprend un premier pilier métallique pour réaliser la ligne de source commune SL_{1a} et un second pilier métallique pour réaliser la ligne d'intersection commune BL_{1a} . La colonne comprend en outre un empilement de quatre transistors indépendants de type grille enrobante (Gate-All-Around en anglais) séparés par un matériau isolant IS1. Chaque transistor correspond au transistor de sélection T1 d'une cellule mémoire. Chaque transistor comprend un canal de conduction CC en silicium ayant une première extrémité correspondant au drain et une seconde extrémité correspondant à la source. L'utilisation des transistors de type grille enrobante permet de réduire considérablement les courants de fuite de la structure. De plus, les transistors de type grille enrobante présentent la possibilité d'être empilés les uns au-dessus des autres afin de réaliser une structure dense selon l'invention. La paroi latérale du côté des drains de l'ensemble des transistors est recouverte d'une succession de couches. La succession de couches comprend dans cet ordre une première couche en un matériau diélectrique C'2 tel que l'oxyde d'hafnium (HfO_2), puis une première couche métallique C'3 en Titane (Ti), puis une deuxième couche métallique en nitrure de titane (TiN) par exemple. La succession de couches obtenue au niveau de chaque drain d'un transistor T1 forme une structure de stockage résistive S1 correspondant à l'empilement de la [Fig.1a]. L'électrode supérieure EL1 se compose de l'ensemble de la première couche métallique en Titane et la deuxième couche métallique en nitrure de titane. La couche centrale C2 est la couche en oxyde d'hafnium. L'électrode inférieure EL2 correspond à l'extrémité du canal du transistor T1. Avantagusement, il est envisageable de déposer une couche métallique supplémentaire entre l'extrémité du

canal du transistor T1 et la première couche en un matériau diélectrique C'2 pour améliorer le contact électrique au niveau de l'électrode inférieure EL2.

- [0113] Un transistor T1 et la structure de stockage résistive S1 qui lui est connectée forment ensemble une cellule mémoire CM selon l'invention. On réalise ainsi un empilement de quatre cellules mémoires CM.
- [0114] La colonne C_k est obtenue par la réalisation de l'agencement suivant : le premier pilier métallique SL_{1a} en contact avec toutes les secondes extrémités correspondant à la source ; et le second pilier métallique BL_{1a} mis en contact avec l'ensemble des électrodes supérieures EL1.
- [0115] La structure présentée dans la [Fig.5b] permet d'implémenter physiquement le circuit selon l'invention avec une densité géométrique améliorée par rapport aux solutions connues. Plus particulièrement, le circuit de calcul dans la mémoire selon l'invention permet d'implémenter une pluralité de cellules mémoire de type 1T1R (un transistor et une résistance) avec une structure tridimensionnelle plus compacte par rapport aux solutions connues.
- [0116] La [Fig.5c] illustre un deuxième mode de réalisation du circuit de calcul dans la mémoire selon l'invention. Dans ce mode de réalisation le circuit de calcul dans la mémoire 10 comprend en outre pour chaque ligne d'interconnexion ($BL_{1a}, BL_{1b}, BL_{2a}, BL_{2b}$) un transistor de contrôle T_{reg} . Chaque transistor de régulation T_{reg} présente une grille recevant un signal de régulation VWL_{BL} . Chaque transistor de régulation T_{reg} reliant la ligne d'interconnexion BL_{1a} associée à la masse de manière à réaliser une impédance variable. Le contrôle de l'impédance est réalisé via le signal de régulation VWL_{BL} généré par les moyens de contrôle du circuit de calcul 10. Cela permet de contrôler indirectement le ratio du pont diviseur obtenu par les cellules mémoires formant un groupe élémentaire.
- [0117] La [Fig.6a] illustre un troisième mode de réalisation du circuit de calcul dans la mémoire selon l'invention. Dans ce mode de réalisation, le circuit de calcul dans la mémoire 10 est tel que chaque ligne d'interconnexion BL_{1a} est connectée à la ligne d'intersection suivante BL_{1b} par l'intermédiaire d'un interrupteur i1. À titre d'exemple l'interrupteur i1 est réalisé par une grille de passage (pass-gate en anglais) formée par deux transistors complémentaires. L'ouverture et la fermeture de la grille de passage est commandée par des signaux complémentaires WL_{trans1} et WL_{trans2} générés par les moyens de contrôle du circuit 10. L'ensemble des interrupteurs i1 permettent de réaliser une fonction de transfert du contenu stocké dans une cellule mémoire à une autre cellule mémoire d'un plan mémoire différent.
- [0118] La [Fig.6b] illustre un groupe élémentaire de cellules mémoires selon un quatrième mode de réalisation de l'invention destiné à réaliser un transfert de données.
- [0119] La cellule mémoire de départ CM1 appartient à une colonne quelconque de rang k C_k

d'un premier plan P_{in} . La cellule mémoire d'arrivée (de destination) CM_2 appartient à une colonne de rang $k+1$ ou $k-1$ d'un second plan P_{out} différent. La ligne d'interconnexion commune BL_{1a} connectée à la cellule mémoire de départ CM_1 est connectée à la ligne d'interconnexion BL_{1b} connectée à la cellule mémoire d'arrivée CM_2 via une grille de passage.

[0120] La [Fig.6c] illustre les étapes pour réaliser un transfert de données avec le groupe élémentaire de cellules mémoires selon le quatrième mode de réalisation de l'invention. Le procédé de transfert décrit permet un transfert de données tout en protégeant le contenu des cellules mémoires CM_{par_out} et CM_{par_in} pouvant être impactées par le transfert. La cellule mémoire CM_{par_in} appartient au même plan de la cellule mémoire de départ et est connectée à la même ligne d'interconnexion de la cellule mémoire d'arrivée CM_{par_out} .

[0121] Les moyens de contrôle sont configurés pour réaliser le transfert d'une donnée stockée d'une cellule mémoire de départ CM_1 à une cellule mémoire d'arrivée CM_2 .

[0122] La première étape i' consiste à initialiser la cellule d'arrivée (CM_2) à un état résistif haut.

[0123] L'étape suivante ii' consiste à mettre l'interrupteur i_1 à l'état passant de manière à connecter électriquement la ligne d'interconnexion BL_{1a} et la ligne d'interconnexion BL_{1b} .

[0124] L'étape suivante iii' consiste à réaliser simultanément les opérations suivantes :

- a. l'application d'une première tension de transfert VSL_{1a} positive sur le premier nœud d'entrée/sortie SL_{1a} de la cellule mémoire de départ CM_1 ;
- b. la connexion du premier nœud d'entrée/sortie SL_{2b} de la cellule mémoire d'arrivée CM_2 à la masse électrique ;
- c. l'application d'une seconde tension de transfert VSL_{1b} positive sur le premier nœud d'entrée/sortie SL_{1b} de la cellule mémoire CM_{par_in} ;
- d. l'application de la seconde tension de transfert positive sur le premier nœud d'entrée/sortie VSL_{2a} de la cellule mémoire CM_{par_out} ;

[0125] L'amplitude de première tension de transfert VSL_{1a} est suffisamment élevée pour provoquer un passage à un état résistif bas de la cellule mémoire d'arrivée CM_2 lorsque la cellule mémoire de départ est à un état résistif bas ($x=1$). L'amplitude de la seconde tension de transfert VSL_{1b} positive est choisie de manière à obtenir dans tous les cas une tension inférieure aux tensions de seuil V_{set} et V_{reset} aux bornes de CM_{par_in} et CM_{par_out} . Ainsi, le contenu de ces deux cellules est préservé lors du transfert. A titre d'exemple, la première tension de transfert VSL_{1a} est choisie égale à la tension d'alimentation VDD . La seconde tension de transfert VSL_{1b} est égale à la moitié de la tension d'alimentation VDD .

[0126] Nous avons ainsi démontré la possibilité de réaliser un transfert de données d'un plan

mémoire à un autre du circuit de calcul dans la mémoire 10 selon l'invention.

[0127] Nous allons décrire, dans ce qui suit, un exemple d'une application algorithmique du circuit de calcul dans la mémoire 10 selon l'invention. Les algorithmes de calcul hyper-dimensionnel (Hyperdimensional Computing en anglais) présentent des applications intéressantes du circuit de calcul dans la mémoire selon l'invention. Ce paradigme de calcul repose sur la manipulation de vecteurs de données de grande taille appelés hypervecteurs (ayant D coordonnées avec $D > 1000$). Il est possible d'utiliser cette approche pour la classification de textes par langage: un texte est lu séquentiellement lettre par lettre. Chaque lettre est associée à un hypervecteur différent. Tous les hypervecteurs des lettres du texte sont alors combinés entre eux grâce aux opérations élémentaires de multiplication (via la fonction XNOR), d'addition et de permutation (via la fonction de transfert) pour créer un hypervecteur unique associé au texte. L'hypervecteur du texte permet ensuite de reconnaître la langue du texte par comparaison avec des hypervecteurs références.

[0128] La [Fig.7] illustre les étapes exécutées par le circuit de calcul 11 selon l'invention pour calculer l'hypervecteur $\underline{Q}$ résultant des hypervecteurs d'entrée suivants :

$$\underline{A}=(A[0], A[1], A[2], A[3], A[4], A[5])$$

$$\underline{B}=(B[0], B[1], B[2], B[3], B[4], B[5])$$

$$\underline{C}=(C[0], C[1], C[2], C[3], C[4], C[5])$$

$$\underline{D}=(D[0], D[1], D[2], D[3], D[4], D[5])$$

L'hypervecteur résultant est défini par $\underline{Q} = \underline{A}\underline{B}\underline{D}\underline{C}\underline{A}\underline{D} = \underline{A}\underline{B}\underline{D} + \underline{B}\underline{D}\underline{C} + \underline{D}\underline{C}\underline{A} + \underline{C}\underline{A}\underline{D}$.

le produit entre deux hypervecteurs $\underline{A}$ et $\underline{B}$ est défini de la manière suivante :

$$\underline{AB}=(A[0]B[0], A[1]B[1], A[2]B[2], A[3]B[3], A[4]B[4], A[5]B[5])$$

[0129] À titre d'exemple, le circuit de calcul dans la mémoire 11 est dimensionné de la manière suivante : il comprend quatre plans mémoire (P_1, P_2, P_3, P_4). Chaque plan comprend quatre lignes et six colonnes. Le premier plan P_1 est destiné à stocker les hypervecteurs d'entrée. Le deuxième plan P_2 est destiné à stocker les résultats des opérations logiques OR. Le troisième plan P_3 est destiné à stocker les résultats des opérations logiques XNOR. Le quatrième plan P_4 est destiné à stocker les coordonnées des résultats intermédiaires $\underline{ABD}$, $\underline{BDC}$, $\underline{DCA}$ et $\underline{CAD}$. L'opération logique $A[i] \text{ OR } B[i]$ correspond à la sommation binaire $A[i] + B[i]$. L'opération logique $A[i] \text{ XNOR } B[i]$ correspond à la multiplication binaire $A[i].B[i]$.

[0130] Initialement, chaque ligne du premier plan mémoire P_1 stocke les coordonnées d'un hypervecteur d'entrée $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$, ou $\underline{D}$.

[0131] Pendant l'étape 1a, le circuit de calcul 11 est configuré pour calculer parallèlement dans la première ligne du deuxième plan P_2 les résultats $(\underline{A}+\underline{B})[i] = A[i] \text{ OR } B[i]$. Ensuite, le circuit de calcul 11 est configuré pour calculer parallèlement dans la première ligne du troisième plan P_3 les résultats $(\underline{A.B})[i] = A[i] \text{ XNOR } B[i]$.

- [0132] Pendant l'étape suivante 1b, le circuit de calcul 11 est configuré pour calculer parallèlement dans la première ligne du deuxième plan P_2 les résultats $(AB+D)[i] = AB[i] \text{ OR } D[i]$. Ensuite, le circuit de calcul 11 est configuré pour calculer parallèlement dans la première ligne du quatrième plan P_4 les résultats $(A.B.D)[i] = AB[i] \text{ XNOR } D[i]$. Les coordonnées du vecteur AB étant calculées et stockées dans les cellules mémoire du troisième plan P_3 au cours de l'étape 1a.
- [0133] On obtient ainsi, les coordonnées du vecteur ABD dans la première ligne du quatrième plan P_4 .
- [0134] Ensuite, la séquence d'étapes est réitérée pour calculer les coordonnées du vecteur BDC dans la deuxième ligne du quatrième plan P_4 .
- [0135] Ensuite, la séquence d'étapes est réitérée pour calculer les coordonnées du vecteur DCA dans la troisième ligne du quatrième plan P_4 .
- [0136] Ensuite, la séquence d'étapes est réitérée pour calculer les coordonnées du vecteur CAD dans la quatrième ligne du quatrième plan P_4 .
- [0137] On obtient enfin sur le quatrième plan P_4 les coordonnées des trigrammes ABD, BDC, DCA et CAD. La dernière étape consiste à calculer la somme de chaque colonne pour générer l'hypervecteur résultant O comme illustré.
- [0138] D'une manière générale, les différents modes de réalisation du circuit de calcul dans la mémoire selon l'invention permettent d'exécuter tout type d'algorithme impliquant des opérations logiques booléennes élémentaires de type OR et AND. De plus, l'homme du métier peut implémenter des opérations logiques booléennes plus complexes à partir des résultats desdites opérations logiques booléennes élémentaires préalablement décrites.
- [0139] La [Fig.8] illustre un groupe élémentaire de cellules mémoires selon un troisième mode de réalisation de l'invention destiné à réaliser l'opération logique A OU B. Le groupe élémentaire selon le troisième mode de réalisation se distingue de celui du premier mode de réalisation par ce qui suit : Les premiers nœuds d'entrée/sortie SL de la première, de la deuxième et des troisièmes cellules mémoire CM_A , CM_B et CM_{OR} sont interconnectés par une ligne d'interconnexion commune SL_{1a} . La ligne d'interconnexion commune correspond dans ce cas à la ligne de sources (source line en Anglais) des cellules mémoire CM_A , CM_B et CM_{OR} .
- [0140] Dans le groupe élémentaire illustré, la première cellule mémoire CM_A , la deuxième cellule mémoire CM_B et la troisième cellule mémoire CM_{OR} appartiennent toutes à des colonnes de même rang dans leurs matrices respectives. Dans le même plan mémoire, les seconds nœuds d'entrée/sorties BL des cellules mémoires appartenant à la même colonne C_k sont interconnectés par une ligne de données commune (bit line en anglais). Ce mode de réalisation peut être utilisé pour réaliser des opérations logiques de type OU, ET en appliquant un jeu de tension prédéterminée de la façon similaire à

ce qui est décrit pour le premier mode de réalisation.

[0141] Références :

[1] Memory devices and applications for in-memory computing, A. Sebastian, Nature nanotechnology 2020.

[2] Four-Layer 3D Vertical RRAM Integrated with FinFET as a Versatile Computing Unit for Brain-Inspired Cognitive Information Processing, H.Li, et al., Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers, 2016

Revendications

[Revendication 1]

Circuit de calcul dans la mémoire (10) comprenant une pluralité de plans mémoire (P_i) de rang i allant de 1 à N , avec N un entier naturel supérieur à 1, chaque plan formant une matrice bidimensionnelle de cellules mémoire non volatiles, résistives et programmables, chaque cellule mémoire ayant un nœud de sélection (WL), un premier nœud d'entrée/sortie (SL) et un second nœud d'entrée/sortie (BL) ; ladite matrice comprenant M lignes (L_j) de rang j allant de 1 à M et K colonnes (C_k) de rang k allant de 1 à K , avec M et K deux entiers naturels non nuls; ledit circuit de calcul (10) comprenant :

- des moyens de contrôle configurés pour commander les noeuds des cellules mémoire pour réaliser des opérations de stockage et de calcul en mémoire réalisées par le circuit de calcul ;
- au moins un groupe élémentaire de cellules mémoires comprenant :
 - une première cellule mémoire (CM_A) appartenant à l'un quelconque des plans mémoire (P_{in1}) et destinée à stocker une première donnée d'entrée (A) ;
 - une deuxième cellule mémoire (CM_B) appartenant à l'un quelconque des plans mémoire (P_{in1}) et destinée à stocker une deuxième donnée d'entrée (B) ;
 - une troisième cellule mémoire (CM_{OR}, CM_{AND}) appartenant à un plan mémoire (P_{OR1}) différent de celui de la première et la deuxième cellules mémoire (CM_A, CM_B); la troisième cellule mémoire étant destinée à stocker le résultat d'une première opération logique ayant pour opérandes la première et la deuxième données d'entrée ;

la première, deuxième et troisième cellules mémoire (CM_A, CM_B, CM_{OR}) appartenant à des colonnes (C_k) de même rang k dans leurs matrices respectives ;

la première, la deuxième et la troisième cellules mémoire (CM_A, CM_B, CM_{OR}) étant interconnectées par une ligne d'interconnexion commune (BL_{1a}, SL_{1a}) ; ladite ligne d'interconnexion commune connectant l'un à

l'autre les premiers nœuds d'entrée/sortie (SL) des cellules mémoire dudit groupe élémentaire ou les seconds nœuds d'entrée/sortie (BL) des cellules mémoire dudit groupe élémentaire ;

les nœuds de sélection (WL) des cellules mémoires appartenant à la même ligne (L_j) sont interconnectés par une ligne de sélection (WL_{ij}) ;

les premiers nœuds d'entrée/sorties (SL) des cellules mémoires appartenant à la même colonne (C_k) sont interconnectés ;

les seconds nœuds d'entrée/sorties (BL) des cellules mémoires appartenant à la même colonne (C_k) sont interconnectés.

[Revendication 2]

Circuit de calcul dans la mémoire (10) selon la revendication 1 dans lequel chaque cellule mémoire (CM_A, CM_B, CM_{OR}) comprend :

- une structure de stockage résistive programmable ayant :
 - une électrode supérieure (EL1) connectée au second nœud d'entrée/sortie (BL) de ladite cellule mémoire (CM_A, CM_B, CM_{OR}) ;
 - et une électrode inférieure (EL2) ;
- un transistor de sélection (T1) ayant une grille connectée au nœud de sélection (WL) de ladite cellule mémoire et reliant l'électrode inférieure (EL2) au premier nœud d'entrée/sortie (SL) de ladite cellule mémoire (CM_A, CM_B, CM_{OR}).

[Revendication 3]

Circuit de calcul dans la mémoire (10) selon la revendication 2 dans lequel chaque colonne (C_k) de cellules mémoire (CM) comprend :

- Un empilement d'une pluralité de transistors de sélection (T1) selon une première direction (Δ) ;

chaque transistor de sélection, notamment de type grille enrobante, comprenant un canal de conduction (CC), perpendiculaire à la première direction (Δ) en un matériau semiconducteur et ayant deux extrémités ; la première extrémité du canal correspondant à la source du transistor de sélection et la seconde correspondant au drain du transistor ;

- un premier pilier métallique (SL_{1a}) selon la première direction (Δ) connectant les sources des différents transistors de sélection ;
- une couche en diélectrique ($C'2$) parallèle à la première direction (Δ) et couvrant latéralement les drains des transistors

de sélection ;

- au moins une couche métallique (C'3) en parallèle à la première direction déposée sur la couche en diélectrique ;
- un second pilier métallique (BL_{1a}) selon la première direction (Δ) ayant un contact latéral avec l'au moins couche métallique ;

pour chaque transistor de sélection, l'ensemble formé par le drain, la couche en diélectrique (C'2) et la couche métallique (C'3) constitue une structure de stockage résistive (S1).

[Revendication 4]

Circuit de calcul dans la mémoire (10) selon l'une quelconque des revendications précédentes tel que pour chaque plan mémoire (P_{in1} , P_{OR1}) : les premiers nœuds d'entrée/sortie (SL) des cellules mémoire appartenant aux colonnes (C_k) de rangs impairs sont interconnectés formant une première ligne de source (SL_{1a}) ; les premiers nœuds d'entrée (SL) des cellules mémoire appartenant aux colonnes (C_k) de rangs pairs sont interconnectés formant une seconde ligne de source (SL_{1b}) ; la première ligne de source et la seconde ligne de source étant distinctes ;

[Revendication 5]

Circuit de calcul dans la mémoire (10) selon l'une quelconque des revendications 1 à 4 dans lequel le groupe élémentaire de cellules mémoires comprend en outre une quatrième cellule mémoire (CM_{XNOR}) appartenant à un plan mémoire différent de celui de la première, deuxième et troisième cellules mémoire (CM_A , CM_B , CM_{OR}) ; la quatrième cellule mémoire étant destinée à stocker le résultat d'une deuxième opération logique ayant pour opérandes la première et la deuxième données d'entrée et utilisant le résultat de la première opération logique stocké dans la troisième cellule mémoire (CM_{OR}) ; la quatrième cellule mémoire (CM_{XNOR}) étant connectée à la première, à la deuxième et à la troisième cellules mémoire (CM_A , CM_B , CM_{OR}) via la ligne d'interconnexion commune (BL_{1a} , SL_{1a}).

[Revendication 6]

Circuit de calcul dans la mémoire (10) selon l'une quelconque des revendications 1 à 5 dans lequel pour chaque groupe élémentaire de cellules mémoires, la ligne d'interconnexion (BL_{1a}) connecte l'un à l'autre les seconds nœuds d'entrée/sortie (BL) des cellules mémoire dudit groupe élémentaire.

- [Revendication 7] Circuit de calcul dans la mémoire (10) selon l'une quelconque des revendications 1 à 6 dans lequel la première opération logique est une fonction booléenne OU.
- [Revendication 8] Circuit de calcul dans la mémoire (10) selon la revendication 7 dans lequel les moyens de contrôle sont configurés pour réaliser les étapes suivantes afin de réaliser la fonction logique OU :
- i. Initialiser la troisième cellule à un état résistif haut ;
 - ii. sélectionner la première et la troisième cellule mémoire (CM_A , CM_{OR}) en mettant à l'état passant leurs transistors de sélection (T1) ;
 - iii. appliquer une première tension de lecture positive sur le premier nœud d'entrée/sortie (SL_{1a}) de la première cellule mémoire et connecter simultanément le premier nœud d'entrée/sortie (SL_{2a}) de la troisième cellule mémoire à la masse électrique ;
 - iv. sélectionner la deuxième et la troisième cellule mémoire (CM_B , CM_{OR}) en mettant à l'état passant leurs transistors de sélection (T1) ;
 - v. appliquer la première tension de lecture positive sur le premier nœud d'entrée/sortie (SL_{1a}) de la première cellule mémoire et connecter simultanément le premier nœud d'entrée/sortie (SL_{2a}) de la troisième cellule mémoire à la masse électrique ;
- chaque cellule mémoire présentant:
- un premier seuil de tension (V_{set}) pour passer d'un état résistif haut à un état résistif bas ; et un second seuil de tension (V_{reset}) pour passer d'un état résistif bas à un état résistif haut supérieur au premier seuil de tension (V_{set}) ;
- ladite première tension de lecture étant positive avec une amplitude supérieure ou égale au premier seuil de passage et strictement inférieure au second seuil de passage.
- [Revendication 9] Circuit de calcul dans la mémoire (10) selon l'une quelconque des revendications 7 ou 8 en combinaison avec la revendication 6 dans lequel la deuxième opération logique est une fonction booléenne NON-OU exclusive (XNOR).
- [Revendication 10] Circuit de calcul dans la mémoire (10) selon la revendication 9 dans lequel les moyens de contrôle sont configurés pour réaliser les étapes

suivantes afin de réaliser la fonction logique NON-OU exclusive (XNOR) :

- i. Initialiser la quatrième cellule à un état résistif bas ;
- ii. sélectionner la première, la troisième et la quatrième cellule mémoire (CM_A , CM_{OR} , CM_{XNOR}) en mettant à l'état passant leurs transistors ;
- iii. réaliser simultanément :
 - a. l'application d'une deuxième tension de lecture positive (VSL_{1a}) sur le premier nœud d'entrée/sortie (SL_{1a}) de la première cellule mémoire (CM_A) ;
 - b. l'application d'une troisième tension de lecture négative (VSL_{2a}) sur le premier nœud d'entrée/sortie (SL_{2a}) de la troisième cellule mémoire (CM_{OR}) ;
 - c. et l'application d'une quatrième tension de lecture positive (VSL_{3a}) sur le premier nœud d'entrée/sortie (SL_{3a}) de la quatrième cellule mémoire (CM_{XNOR}) ;
- iv. sélectionner la deuxième, la troisième et la quatrième cellule mémoire (CM_B , CM_{OR} , CM_{XNOR}) en mettant à l'état passant leurs transistors de sélection (T1) ;
- v. réaliser simultanément :
 - a. l'application de la deuxième tension de lecture positive (VSL_{1a}) sur le premier nœud d'entrée/sortie (SL_{1a}) de la deuxième cellule mémoire (CM_B) ;
 - b. l'application de la troisième tension de lecture négative (VSL_{2a}) sur le premier nœud d'entrée/sortie (SL_{2a}) de la troisième cellule mémoire (CM_{OR}) ;
 - c. et l'application d'une quatrième tension de lecture positive (VSL_{3a}) sur le premier nœud d'entrée/sortie (SL_{3a}) de la quatrième cellule mémoire (CM_{XNOR}) ;

la valeur absolue de la troisième tension de lecture (VSL_{2a}) étant sensiblement égale à la valeur absolue de la deuxième tension de lecture (VSL_{1a}) ;

la somme de la valeur absolue de la quatrième tension de lecture (VSL_{3a}) et de la troisième tension de lecture (VSL_{2a}) étant supérieure au second

- seuil de passage (V_{reset}).
- [Revendication 11] Circuit de calcul dans la mémoire (10) selon l'une quelconque des revendications 1 à 6 dans lequel la première opération logique est une fonction booléenne ET.
- [Revendication 12] Circuit de calcul dans la mémoire (10) selon l'une quelconque des revendications précédentes comprenant pour chaque ligne d'interconnexion ($BL_{1a}, BL_{1b}, BL_{2a}, BL_{2b}$) un transistor de régulation (T_{reg}) ; chaque transistor de régulation (T_{reg}) ayant une grille recevant un signal de régulation ($V_{WL_{BL}}$) et reliant la ligne d'interconnexion associée à la masse de manière à réaliser une impédance variable.
- [Revendication 13] Circuit de calcul dans la mémoire (10) selon l'une quelconque des revendications précédentes comprenant une pluralité de groupes élémentaires de cellules mémoires ; chaque ligne d'interconnexion ($BL_{1a}, BL_{1b}, BL_{2a}, BL_{2b}$) étant connectée à une ligne d'interconnexion ($BL_{1a}, BL_{1b}, BL_{2a}, BL_{2b}$) adjacente par l'intermédiaire d'un interrupteur ($i1$).
- [Revendication 14] Circuit de calcul dans la mémoire (10) selon la revendication 13 dans lequel les moyens de contrôle sont configurés pour réaliser le transfert d'une donnée stockée d'une cellule mémoire de départ (CM_1) à une cellule mémoire d'arrivée (CM_2) appartenant à un plan différent de celui de la cellule mémoire de départ et connectée à une ligne d'interconnexion adjacente à celle de la cellule mémoire de départ ; le transfert est réalisé en exécutant les étapes suivantes :
- i' - initialiser la cellule d'arrivée (CM_2) à un état résistif haut ;
 - ii' - mettre l'interrupteur $i1$ à l'état passant
 - iii' - réaliser simultanément :
 - a. l'application d'une première tension de transfert positive sur le premier nœud d'entrée/sortie (SL_{1a}) de la cellule mémoire de départ (CM_1) ;
 - b. la connexion du premier nœud d'entrée/sortie (SL_{2b}) de la cellule mémoire d'arrivée à la masse électrique ;
 - c. l'application d'une seconde tension de transfert positive sur le premier nœud d'entrée/sortie (SL_{1b}) de la cellule mémoire ($CM_{\text{par_in}}$) appartenant au même plan de la cellule mémoire de départ et connectée à la même ligne d'interconnexion de la cellule mémoire d'arrivée ;
 - d. l'application de la seconde tension de transfert positive sur le premier nœud d'entrée/sortie (SL_{2a}) de la cellule mémoire

(CM_{par_out}) appartenant au même plan de la cellule mémoire d'arrivée et connectée à la même ligne de bits de la cellule mémoire de départ ;

l'amplitude de la seconde tension de transfert étant inférieure ou égale à la moitié de la première tension de transfert.

[Revendication 15] Circuit de calcul dans la mémoire (10) selon l'une quelconque des revendications 1 à 5 dans lequel, pour chaque groupe élémentaire de cellules mémoires, la ligne d'interconnexion (SL_{1a}) connecte l'un à l'autre les premiers nœuds d'entrée/sortie (SL) des cellules mémoire dudit groupe élémentaire.

[Fig. 1a]

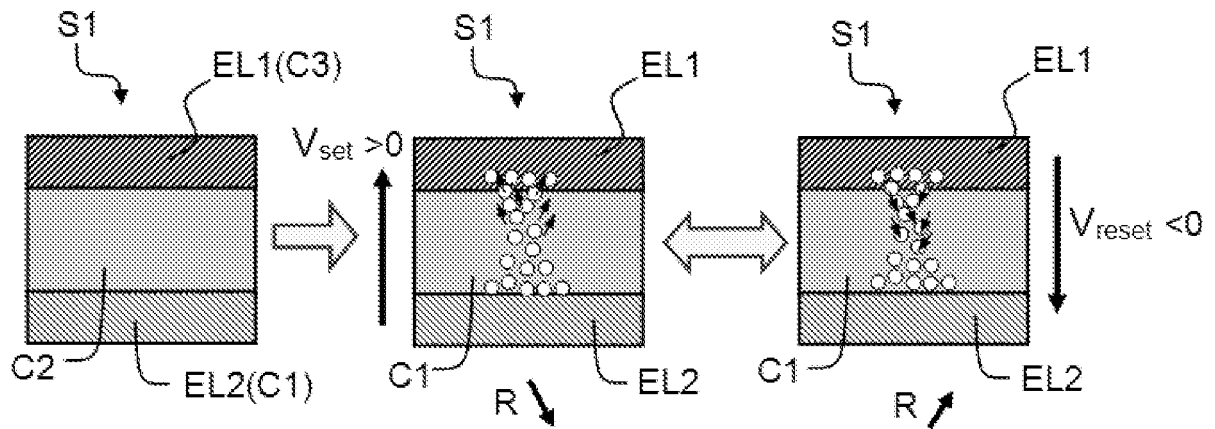


FIG.1a

[Fig. 1b]

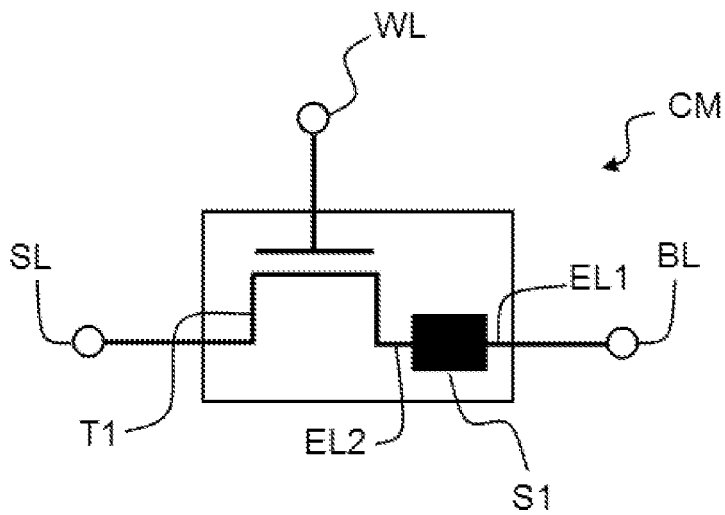


FIG.1b

[Fig. 2a]

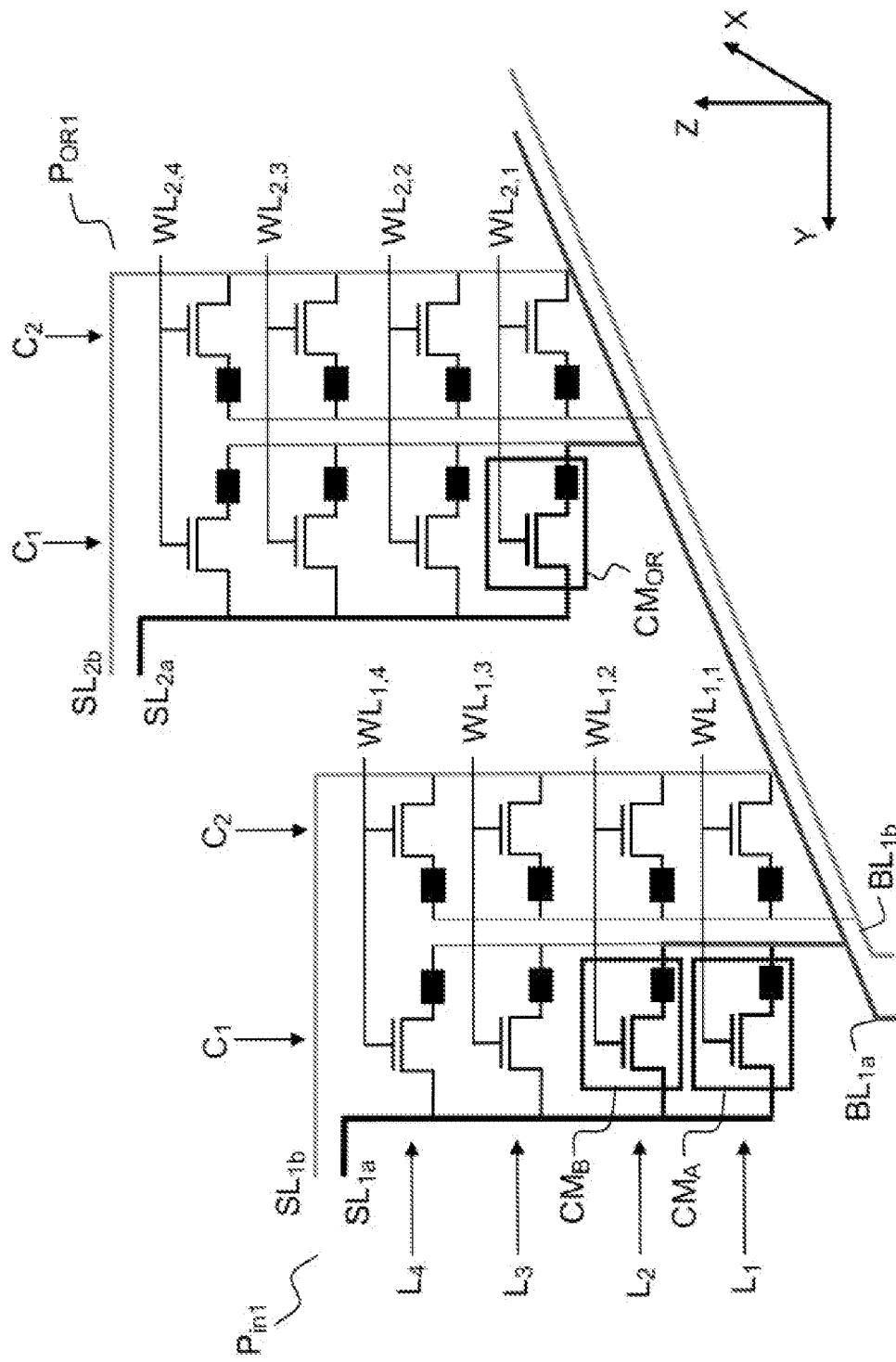


FIG.2a

[Fig. 2b]

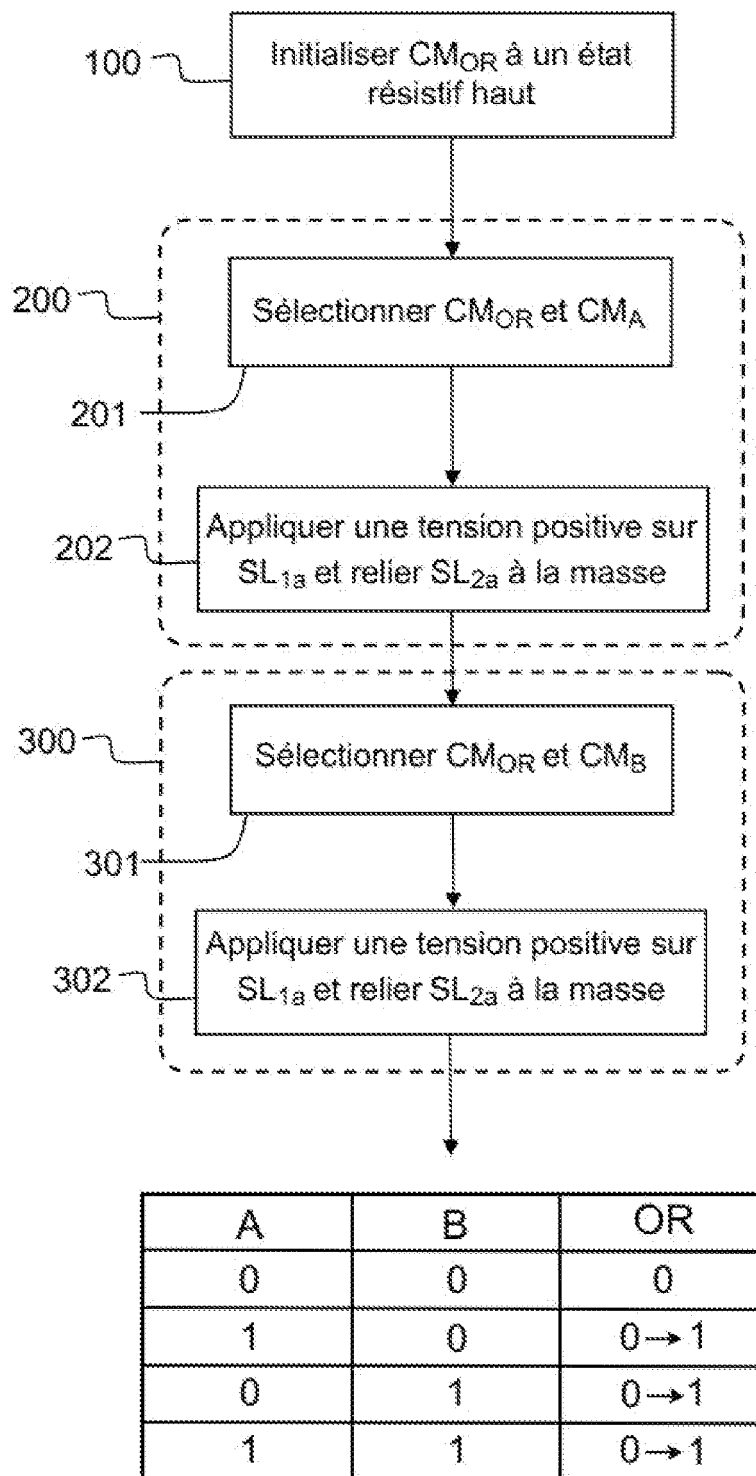


FIG.2b

[Fig. 3a]

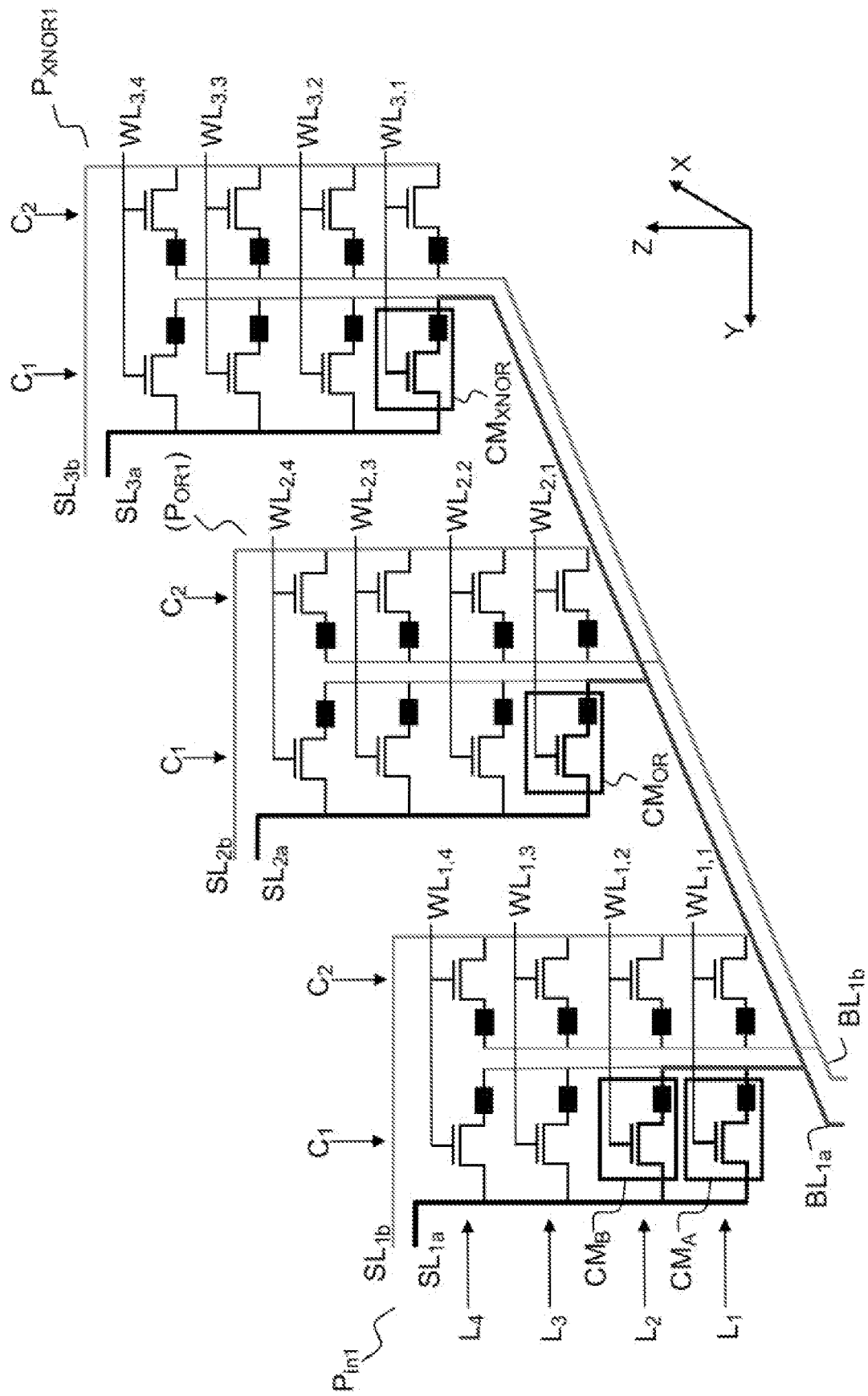
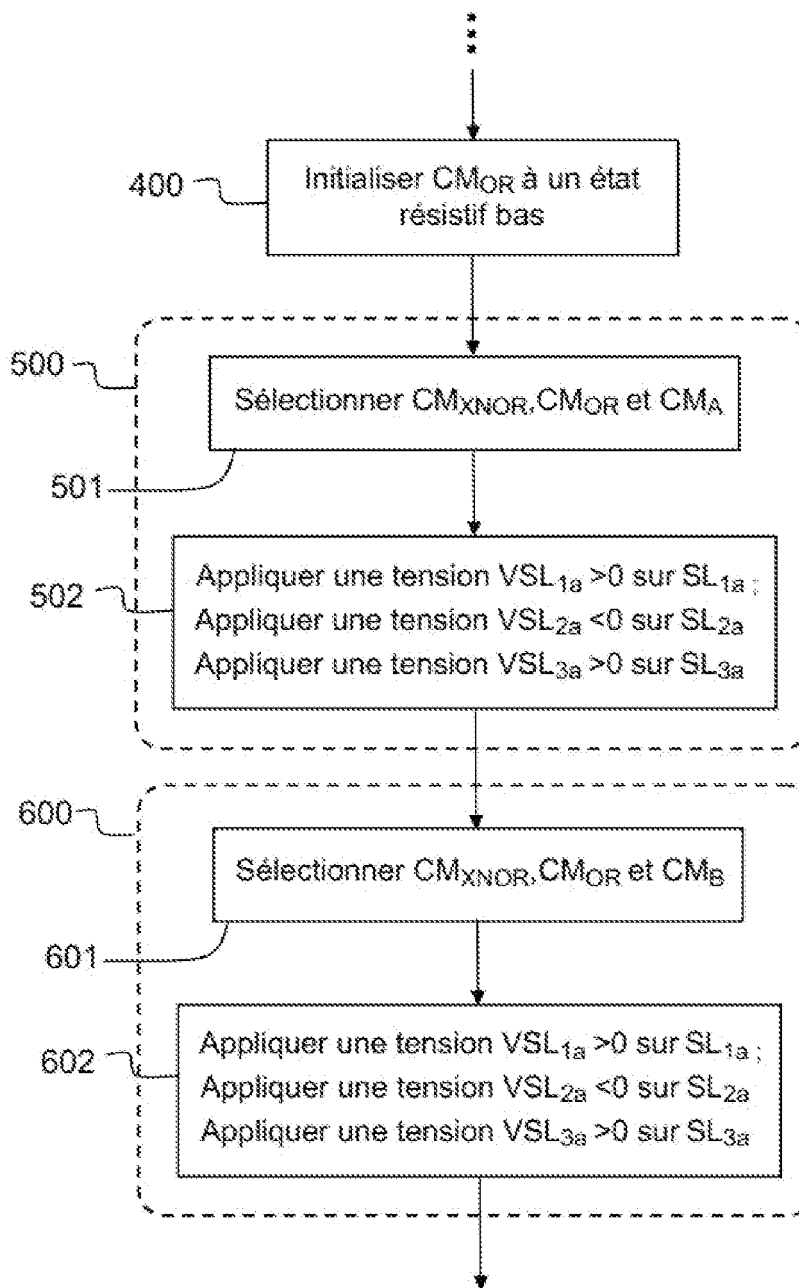


FIG.3a

[Fig. 3b]



A	B	OR	XNOR
0	0	0	1
1	0	0→1	1→0
0	1	0→1	1→0
1	1	0→1	1

FIG.3b

[Fig. 4]

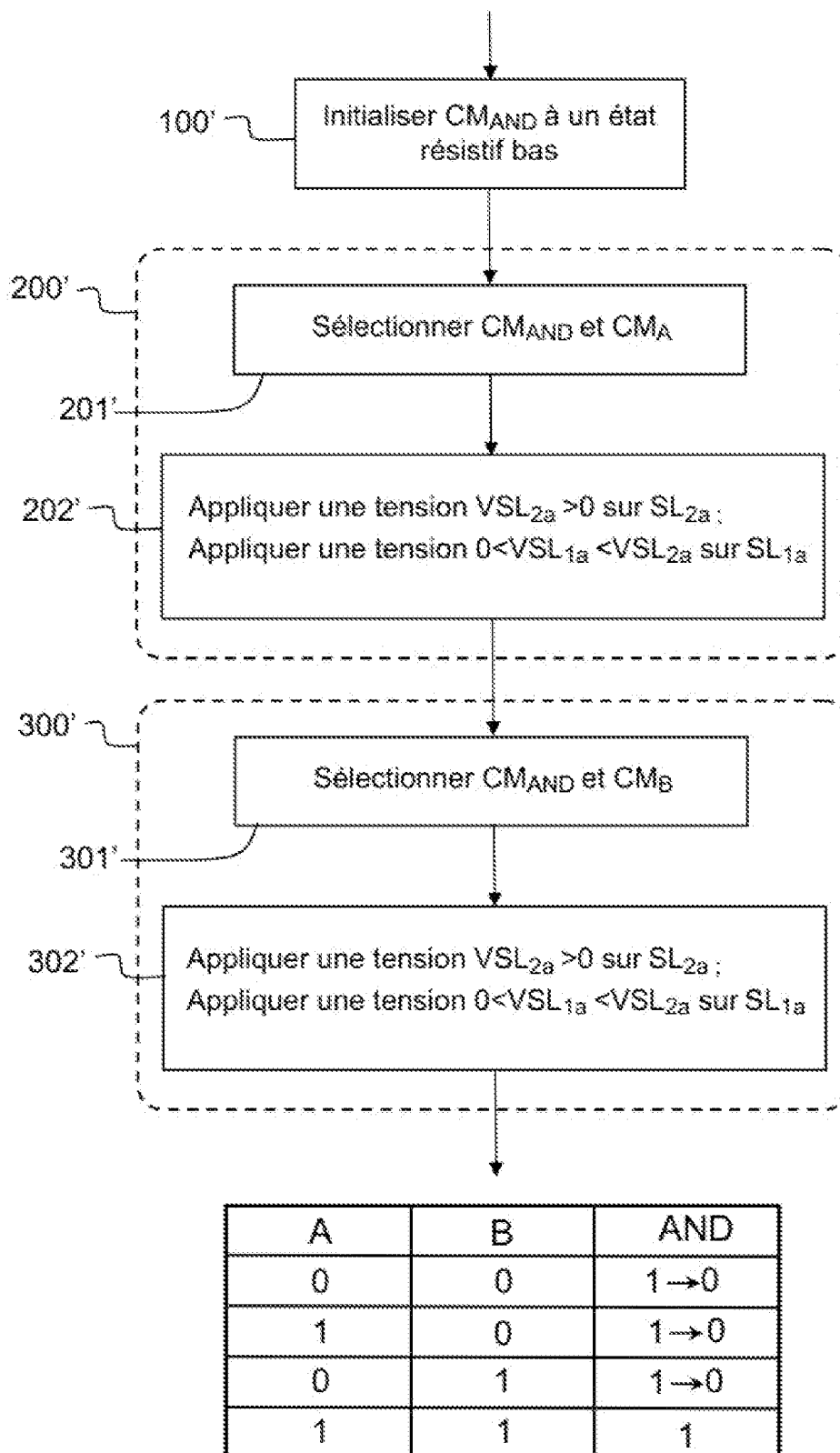


FIG.4

[Fig. 5b]

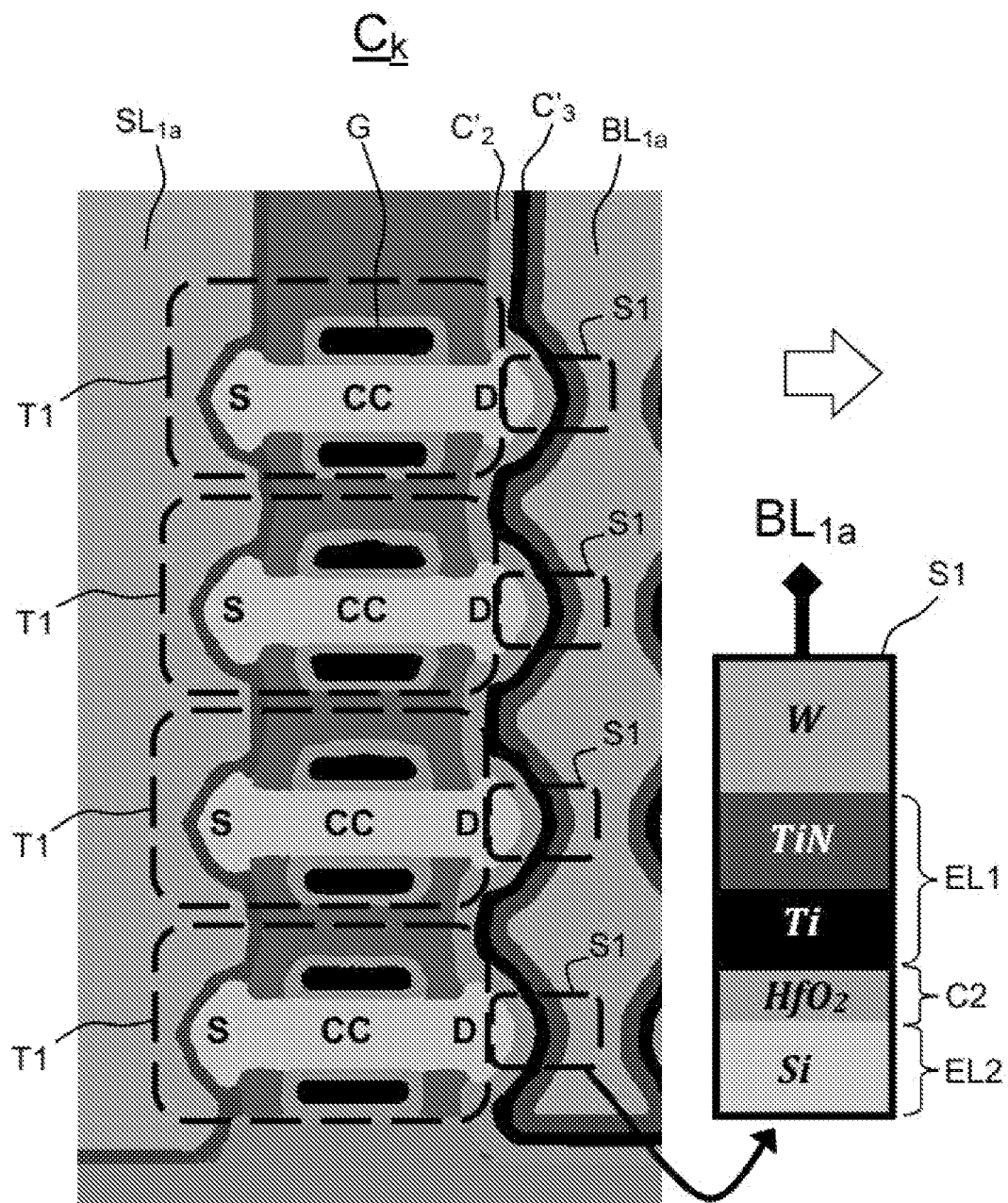


FIG.5b

[Fig. 5c]

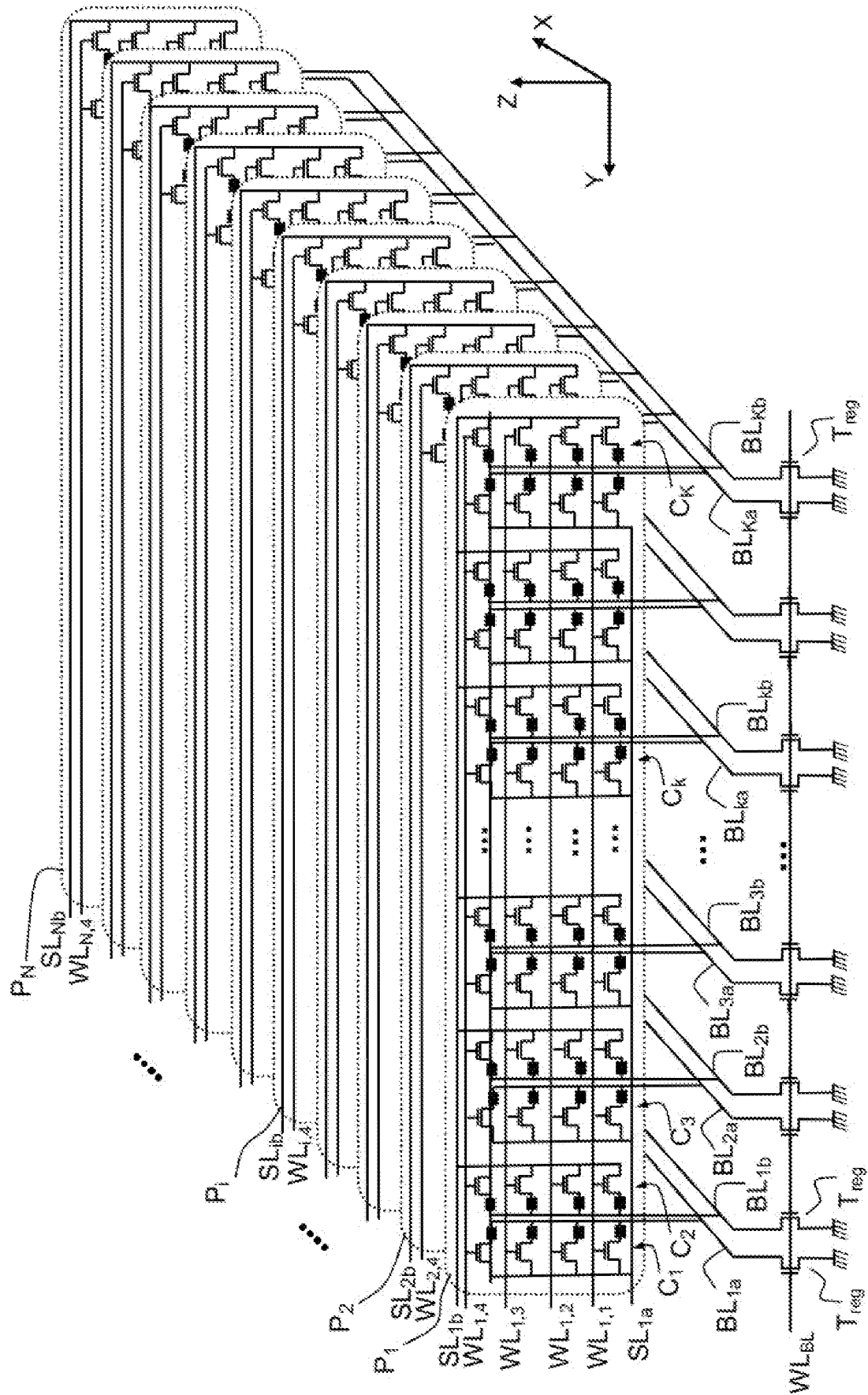
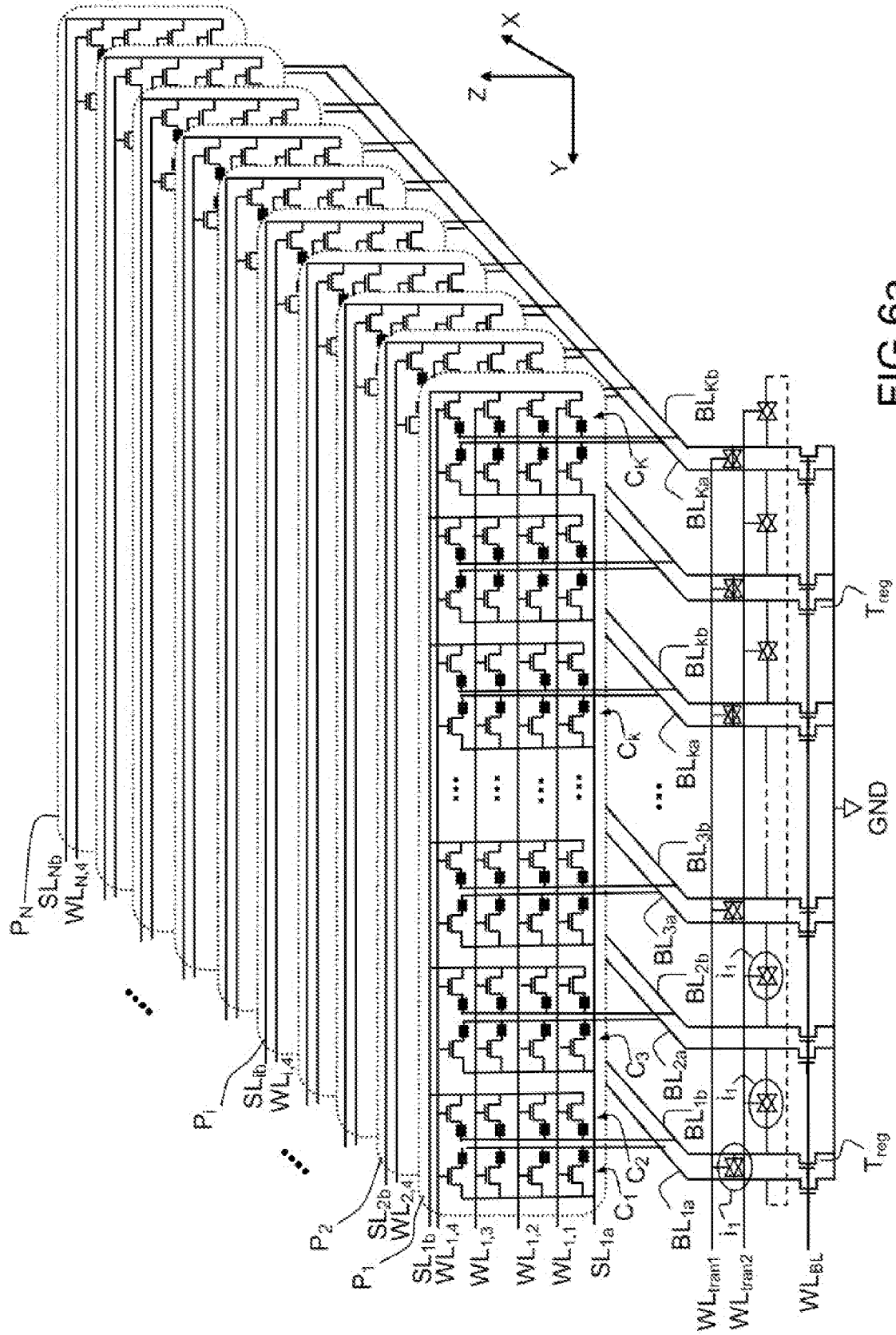


FIG. 5c

[Fig. 6a]



[Fig. 6b]

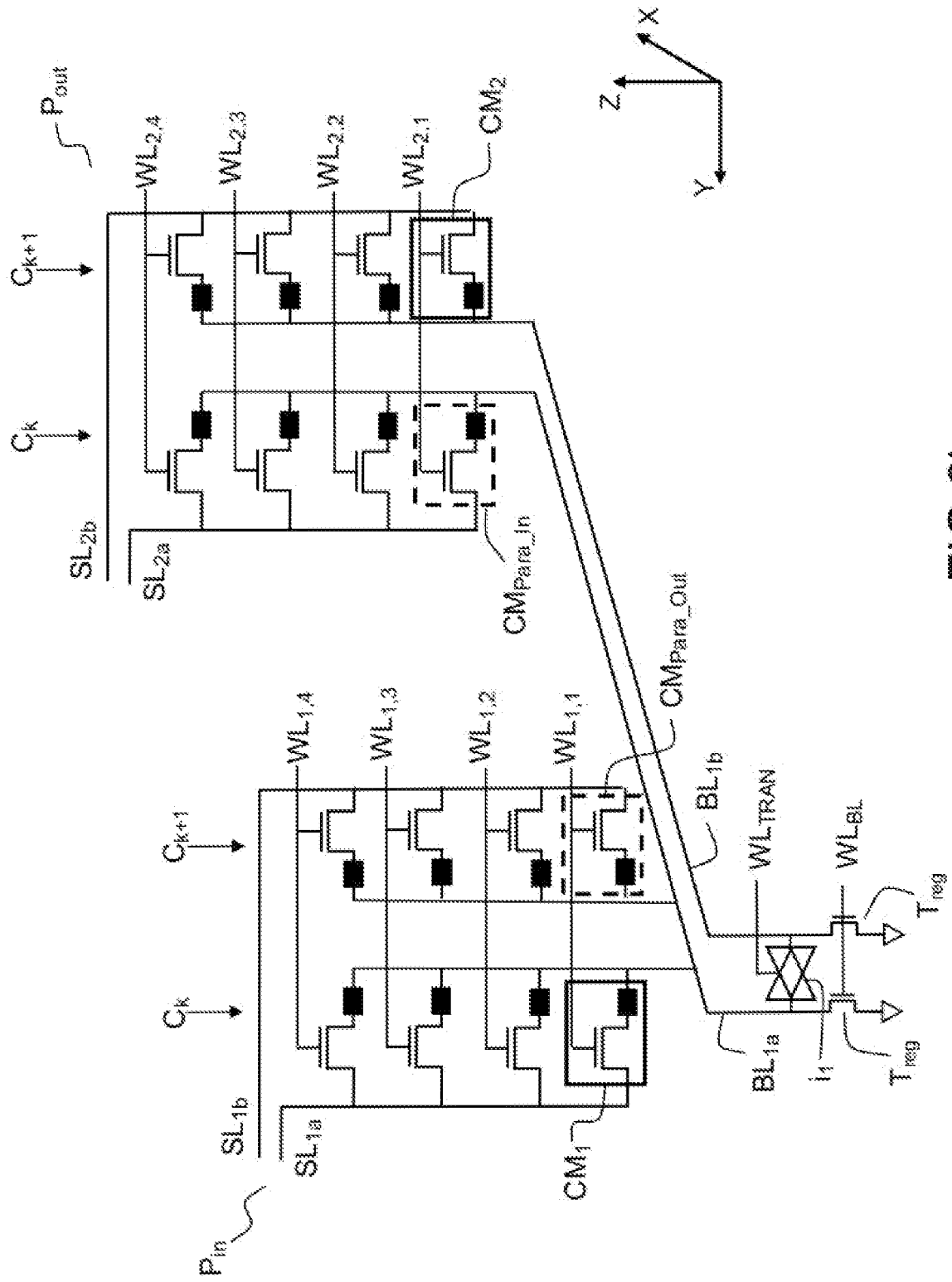


FIG.6b

[Fig. 6c]

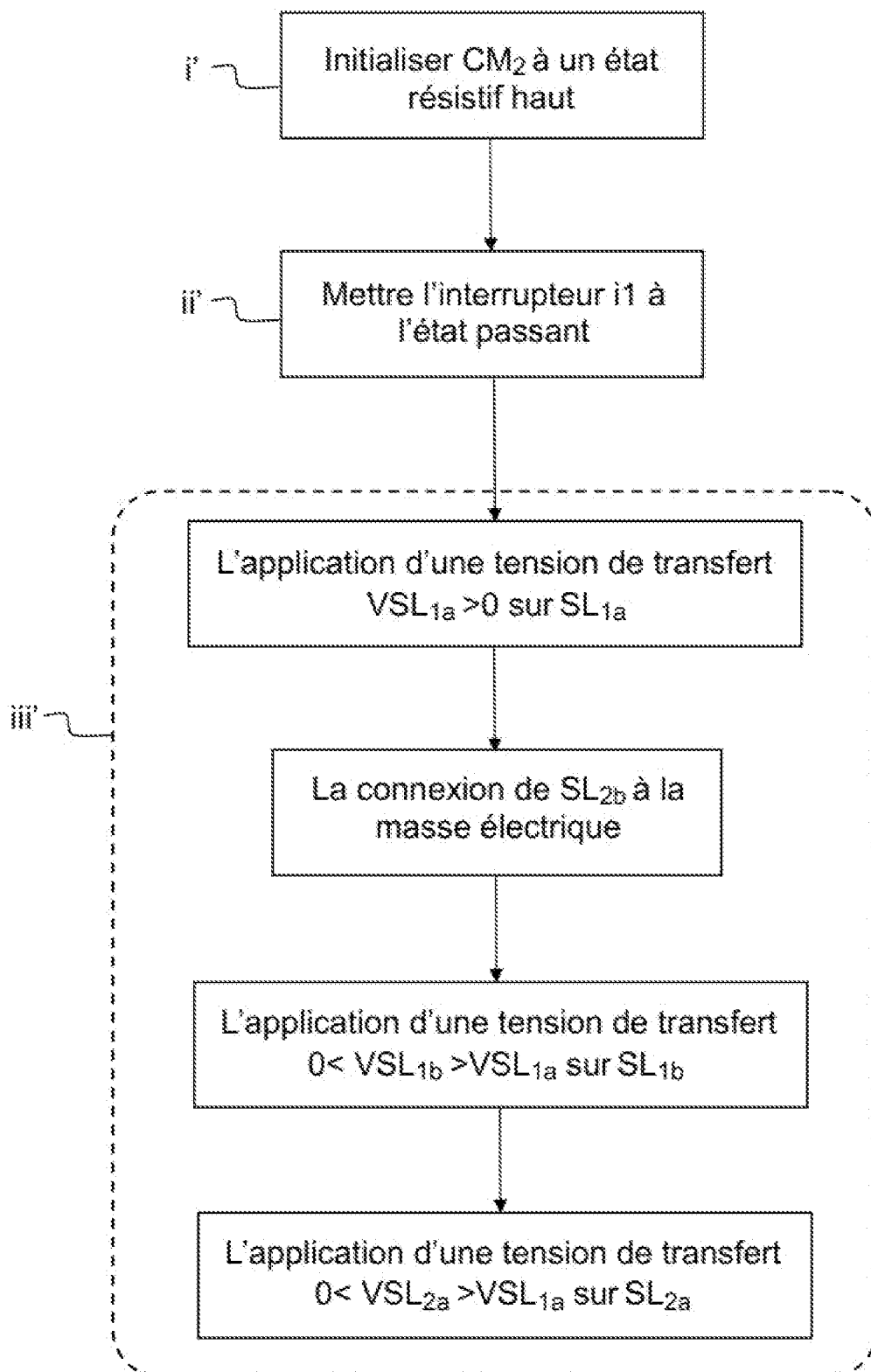


FIG.6c

[Fig. 7]

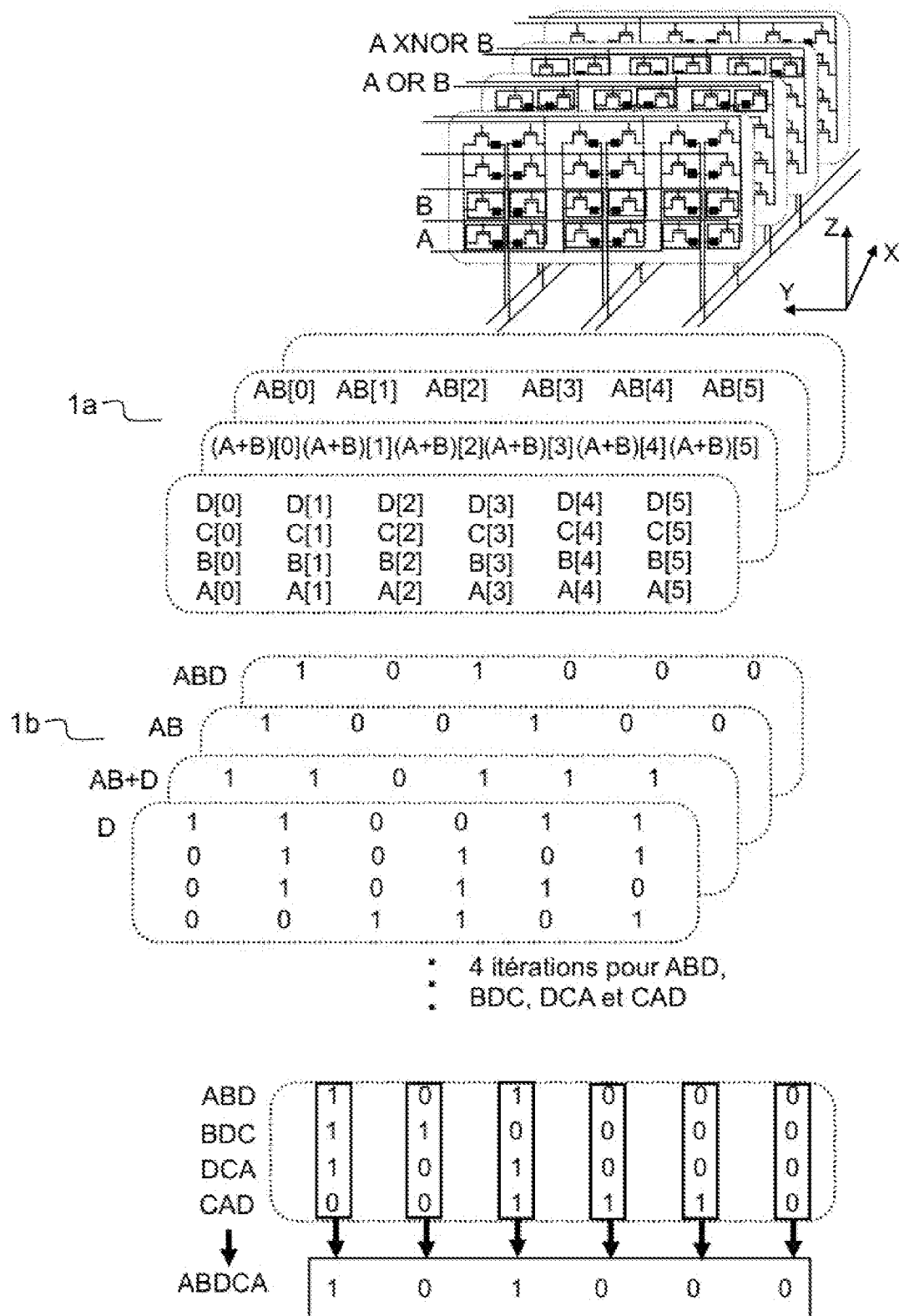


FIG.7

[Fig. 8]

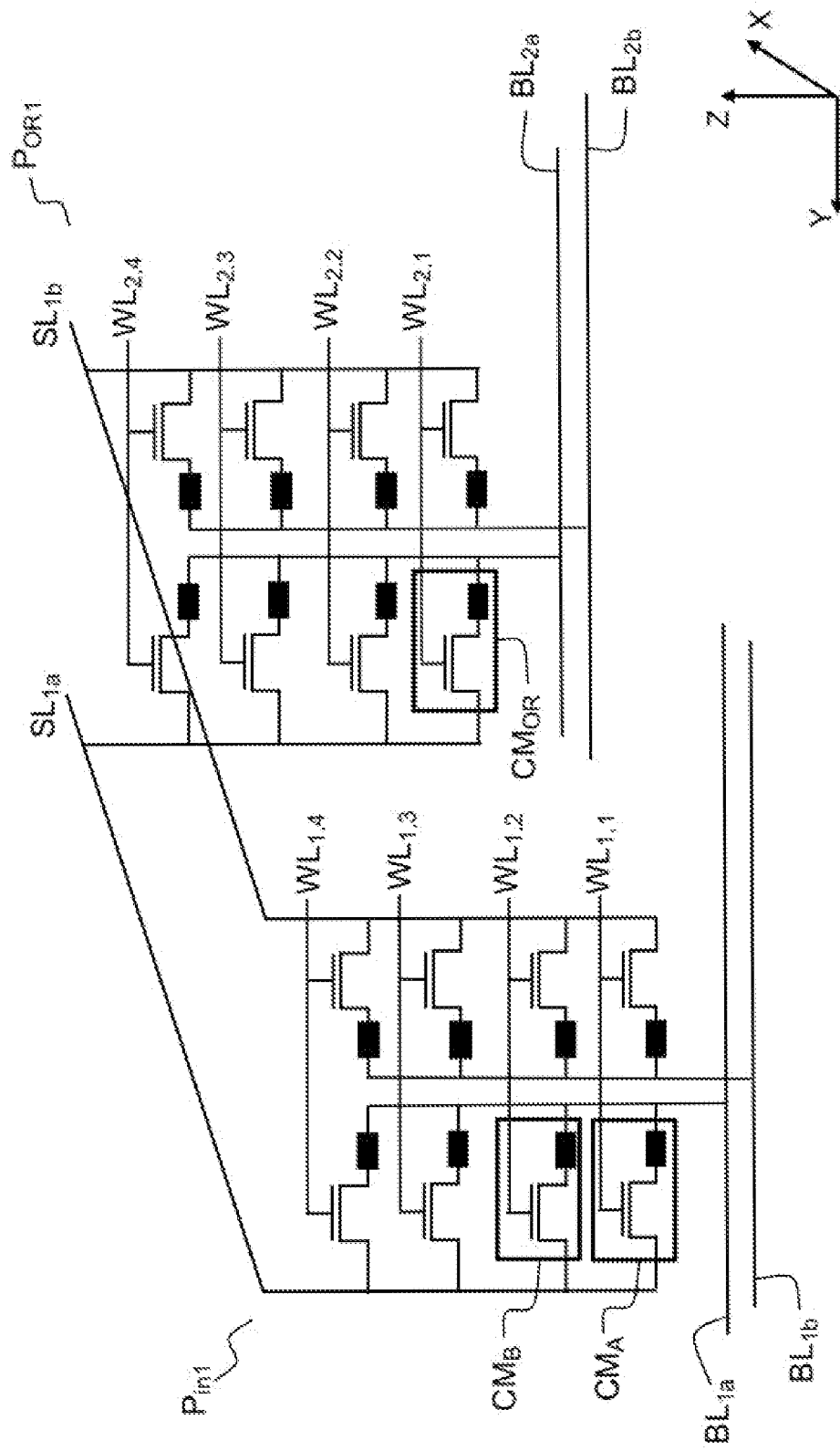


FIG.8

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

☒ Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

☐ Le demandeur a maintenu les revendications.

☒ Le demandeur a modifié les revendications.

☐ Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

☐ Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

☒ Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

☐ Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

NEANT

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

Dubreuil Théophile: "Innovative 3D
Technology of a nonvolatile memory cell
for In-Memory-Computing",

,
31 décembre 2020 (2020-12-31), pages 1-50,
XP055954765,

Extrait de l'Internet:

URL: <https://webthesis.biblio.polito.it/16025/1/tesi.pdf>

[extrait le 2022-08-25]

US 2020/335165 A1 (LIU QI [CN] ET AL)
22 octobre 2020 (2020-10-22)

CN 106 297 876 B (UNIV BEIJING)
16 avril 2019 (2019-04-16)

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT