(19) Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2020 207 439 A1** 2021.12.16

(12) # Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2020 207 439.9**
(22) Anmeldetag: **16.06.2020**
(43) Offenlegungstag: **16.12.2021**

(51) Int Cl.: ***H01L 29/78*** (2006.01)
H01L 29/872 (2006.01)
H01L 27/11502 (2017.01)
H01L 21/336 (2006.01)

(71) Anmelder:
Forschungszentrum Jülich GmbH, 52428 Jülich, DE

(74) Vertreter:
GILLE HRABAL Partnerschaftsgesellschaft mbB Patentanwälte, 40593 Düsseldorf, DE

(72) Erfinder:
Zhao, Qing-Tai, Dr., 52428 Jülich, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	**10 2016 111 237**	**B3**
WO	**2019/ 147 859**	**A2**

B.Tian: A Robust Artificial Synapse Based on Organic Ferroelectric Polymer. In: Advanced Electronic Materials , 5, 2019, 1800600, 8 Seiten.

M.K.Kim et al: Ferroelectric Analog Synaptic Transistors. In: Nano Letters, 19, 2019, 2044 - 2050.

S.Das et al: A biomimetic 2D transistor for audiomorphic computing . In: Nature Communications, 10, 2019 / 1.8.2019, 3450, 10 Seiten.

S.Das: High Performance Multilayer MoS2 Transistors with Scandium Contacts. In: Nano Letters , 13, 2013, 100 - 105.

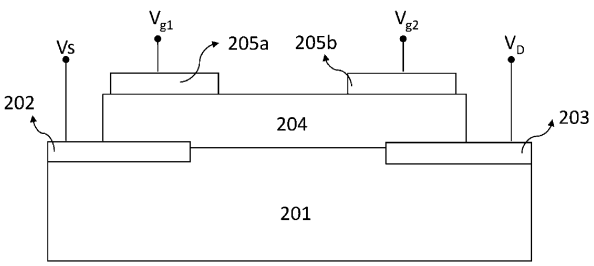
Y.Nishitani: Three – terminal ferroelectric synapse device with concurrent learning function for artificial neural networks. In: Journal of Applied Physics, 111, 2012, 124108, 5 Seiten.

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Neuronen und Synapsen mit ferroelektrisch modulierten Metall-Halbleiter Schottky Dioden nebst Verfahren**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein synaptisches Bauteil für ein neuronales Netzwerk mit einer Schicht aus einem Halbleiter (101, 201) und einer Source - Elektrode (102, 202), die mit der halbleitenden Schicht (101, 201) verbunden ist, und einer Drain - Elektrode (103, 203), die mit der halbleitenden Schicht (101, 201) verbunden ist, wobei die Source - Elektrode (102, 202) von der Drain - Elektrode (103, 203) räumlich getrennt ist, wobei die Source - Elektrode (102, 202) und die halbleitende Schicht (101, 201) eine Schottky - Diode bilden, wobei die Source - Elektrode (102, 202) von einer ersten Gate - Elektrode (105a, 205a) durch ferroelektrisches Material (104a, 104b, 204) getrennt ist.
Die Erfindung betrifft außerdem ein Verfahren für den Betrieb eines erfindungsgemäßen synaptischen Bauteils, indem die erste Schottky - Diode (101, 102; 201, 202) in Sperrrichtung geschaltet wird und an die erste Gate - Elektrode (105a, 205a) eine elektrische Spannung (V_{g1}) pulsförmig angelegt wird.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein synaptisches Bauteil für ein neuronales Netzwerk. Mit synaptischem Bauteil ist ein elektronisches Bauteil gemeint, das Eigenschaften einer biologischen Synapse aufweist. Nachfolgend wird das elektronische Bauteil daher auch Synapse genannt. Mit neuronalem Netzwerk ist ein künstliches neuronales Netzwerk gemeint.

[0002] Ein Gehirn ist ein biologisches neuronales Netzwerk. Es umfasst eine Vielzahl von biologischen Neuronen, also Nervenzellen. Ein biologisches Neuron kann über biologische Synapsen eine Information an ein anderes biologisches Neuron senden. Dies geschieht mithilfe eines Ausgangskanals des biologischen Neurons. Ein solcher Ausgangskanal wird Axon genannt. Das andere biologische Neuron verfügt über einen Eingangskanal. Der Eingangskanal wird Dendrit genannt. Über den Eingangskanal kann das andere biologische Neuron die Information empfangen. Die Entscheidung darüber, ob ein biologisches Neuron ein Aktionspotential über sein Axon auslöst und damit eine Information sendet, hängt von der Gesamtheit der eingehenden Signale ab. Der Einfluss eines biologischen Neurons auf ein anderes biologisches Neuron kann sich bei biologischen Synapsen im Laufe der Zeit mit ihrer Aktivität ändern. Ein solcher Einfluss wird „synaptisches Gewicht“ eines biologischen Neurons bezeichnet.

[0003] Die Eigenschaften und Verhaltensweisen eines neuronalen Netzwerks sollen den Eigenschaften und Verhaltensweisen eines biologischen neuronalen Netzwerks ähneln. Ein neuronales Netzwerk soll mittels lernfähiger Algorithmen Muster erkennen können. Ein neuronales Netz soll, vergleichbar mit dem menschlichen Gehirn, nicht für jede Aufgabe oder jedes Problem von vorne beginnen müssen. Es soll die Möglichkeit haben, auf bereits erworbenes Wissen und schon gemachte Erfahrungen zurückzugreifen.

[0004] Ein neuronales Netzwerk mit Memristoren ist aus der Druckschrift CN 208922326 U bekannt. Skalierung, Stabilität und Sperrfähigkeit sind bei einem neuronalen Netzwerk mit Memristoren problematisch.

[0005] Die Druckschrift WO 2019147859 A2 offenbart ein elektronisches Bauteil mit einem Halbleiterkanal. An ein Ende des Halbleiterkanals grenzt eine Eingangselektrode an. An das andere Ende des Halbleiterkanals grenzt eine Ausgangselektrode an. Oberhalb des Halbleiterkanals gibt es eine Schicht aus dielektrischem Material. Ein als Synapse dienender Schaltkreis aus Halbleitermaterialien mit einem elektrisch geladenen Trägergas wird in der Druckschrift EP 0 529 565 B1 beschrieben. Ein integrierter Schaltkreis für die Bereitstellung einer Synapse ist aus der Druckschrift US 2019164597 A1 bekannt.

[0006] Soll ein neuronales Netzwerk mit konventioneller CMOS Technologie realisiert werden, so wird eine Vielzahl an Transistoren benötigt. Herstellungsaufwand und Energieverbrauch sind dann hoch. Ein neuronales Netzwerk kann ferroelektrische Feldeffekttransistoren (FeFET) umfassen. Traditionelle ferroelektrische Materialien wie Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) sind schädlich für die Umwelt und inkompatibel zur etablierten CMOS Technologie.

[0007] Es ist Aufgabe der Erfindung, eine Synapse, also ein synaptisches Bauteil mit verbesserten Eigenschaften zu schaffen.

[0008] Zur Lösung der Aufgabe dient ein synaptisches Bauteil mit den Merkmalen von Patentanspruch 1. Die abhängigen Ansprüche betreffen vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung. Der nebengeordnete Anspruch betrifft ein Verfahren für den Betrieb des synaptischen Bauteils.

[0009] Patentanspruch 1 betrifft ein synaptisches Bauteil für ein neuronales Netzwerk. Das synaptische Bauteil umfasst eine Schicht, die aus einem Halbleiter besteht. Die aus einem Halbleiter bestehende Schicht wird halbleitende Schicht genannt. Eine Source - Elektrode ist mit der halbleitenden Schicht verbunden. Eine Drain - Elektrode ist mit der halbleitenden Schicht verbunden. Die Source - Elektrode ist von der Drain - Elektrode räumlich getrennt. Die Source - Elektrode und die halbleitende Schicht bilden eine Schottky - Diode. Die Source - Elektrode ist von einer ersten Gate - Elektrode durch ferroelektrisches Material getrennt. Die Drain - Elektrode kann von einer zweiten Gate - Elektrode durch ferroelektrisches Material getrennt sein. Die beiden Gate - Elektroden sind räumlich voneinander getrennt.

[0010] Eine Elektrode ist von einer anderen Elektrode getrennt, wenn es einen Abstand zwischen den beiden Elektroden gibt. Räumlich getrennte Elektroden berühren sich also nicht. Es gibt daher keine elektrisch leitende Verbindung zwischen den beiden Elektroden. Mithilfe des ferroelektrischen Materials kann eine an die erste Gate - Elektrode angelegte elektrische Spannung auf die Source - Elektrode übertragen werden. Entsprechendes gilt für den Fall, dass eine zweite Gate - Elektrode von der Drain - Elektrode durch ferroelektrisches Material getrennt ist. In der Regel befindet sich die eine Gate - Elektrode an einer Seite des ferroelektrischen Materials und die andere Source- bzw. Drain - Elektrode auf einer gegenüberliegenden Seite des ferroelektrischen Materials. Die beiden Elektroden können mit dem ferroelektrischen Material unmittelbar verbunden sein. Die Erfindung nutzt die Memory-Eigenschaften von ferroelektrischem Material aus, um das Verhalten einer biologischen Synapse nachzuahmen.

[0011] Eine Schottky-Diode kann eine Metallschicht umfassen, die auf einer halbleitenden Schicht wie zum Beispiel einer Siliziumschicht aufgebracht ist. Eine Metallschicht ist eine Schicht, die aus Metall besteht. Eine Siliziumschicht ist eine Schicht, die aus Silizium besteht. Silizium ist ein Halbleiter, also ein chemischer Stoff, dessen elektrische Leitfähigkeit zwischen der von elektrischen Leitern und der von elektrischen Isolatoren liegt.

[0012] Die Siliziumschicht kann beispielsweise n - Silizium, also eine n-Typ dotierte Siliziumschicht sein. Elektronen der n-leitenden Siliziumschicht wandern zur Metallschicht. Weil Elektronen leichter aus n-leitendem Silizium in die Metallschicht gelangen als umgekehrt, entsteht in der Siliziumschicht ein an Elektronen verarmter Bereich. Dieser Bereich wird Schottky-Sperrschicht genannt. Es entsteht also eine Sperrschicht bzw. eine Raumladungszone. Außerdem entsteht ein elektrisches Feld. Das elektrische Feld wirkt der Wanderung der Elektroden entgegen. Ist das elektrische Feld groß genug, so wandern keine Elektronen mehr von der n-leitenden Siliziumschicht zur Metallschicht. Die Siliziumschicht kann aber auch p - Silizium, also eine p-Typ dotierte Siliziumschicht sein.

[0013] Wird eine positive elektrische Spannung an n-leitendes Silizium angelegt und eine negative elektrische Spannung an die Metallschicht, dann wird die Raumladungszone größer. Die Schottky - Diode ist dann in Sperrrichtung geschaltet.

[0014] Wird eine elektrisch negative Spannung an n-Silizium angelegt und eine elektrisch positive Spannung an die Metallschicht, dann ist die Schottky - Diode in Durchflussrichtung geschaltet. Elektronen fließen von n-Silizium in die Metallschicht. Ist die Schottky-Diode in Durchlassrichtung geschaltet, dann wird die Raumladungszone freigeräumt.

[0015] Eine Elektrode ist ein elektrischer Leiter. Eine Elektrode besteht grundsätzlich aus Metall.

[0016] Eine erfindungsgemäße Schicht kann geradlinig verlaufen, also entlang einer Ebene. Eine erfindungsgemäße Schicht kann aber auch rund verlaufen und/oder eckig verlaufen.

[0017] Mit dem Bauteil mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 kann das Verhalten einer biologischen Synopse nachgeahmt werden. Das Bauteil kann mit technisch geringem Aufwand hergestellt werden. Das Bauteil kann aus umweltfreundlichen Materialien hergestellt werden.

[0018] Die Source - Elektrode und die Drain - Elektrode können auf einer Seite der halbleitenden Schicht sein. Auf technisch einfache Weise kann ein solches Bauteil hergestellt werden. Die Source - Elektrode und die Drain - Elektrode können auf einer Oberfläche der halbleitenden Schicht durch Abscheidung hergestellt werden.

[0019] Die Source - Elektrode und die Drain - Elektrode können bei gegenüberliegenden Enden der halbleitenden Schicht sein. Es kann so ein geeigneter Abstand zwischen der Source - Elektrode und der Drain - Elektrode bereitgestellt werden.

[0020] Um das Bauteil auf technisch einfache Weise herzustellen, kann das Bauteil ein Substrat umfassen. Oberhalb des Substrats ist dann die halbleitende Schicht aufgebracht. Die halbleitende Schicht kann eine dünne Schicht sein. Das Substrat kann aus Silizium bestehen. Zwischen dem Substrat und dem Halbleiter kann sich eine elektrisch isolierende Schicht befinden. Durch die elektrisch isolierende Schicht können störende Einflüsse vermieden werden.

[0021] Ferroelektrisches Material des Bauteils kann in Form einer Schicht vorliegen. Auf der Source - Elektrode kann also eine Schicht aus ferroelektrischem Material aufgebracht sein. Auf der Drain - Elektrode kann also eine Schicht aus ferroelektrischem Material aufgebracht sein. Eine ferroelektrische Schicht kann sich teilweise auf der halbleitenden Schicht befinden, um eine technisch einfache Herstellung zu ermöglichen. Eine ferroelektrische Schicht kann sich teilweise auf der Source-Elektrode bzw. Drain - Elektrode befinden. Es müssen nicht zwingend zwei räumlich voneinander getrennte Schichten aus ferroelektrischen Material vorhanden sein. Es kann sich um eine einzige Schicht aus ferroelektrischen Material handeln, die sich zumindest teilweise auf der Source - Elektrode und zumindest teilweise auf der Drain - Elektrode befindet. Auch dies kann die Herstellung erleichtern.

[0022] Auf der gegenüberliegenden Seite einer solchen ferroelektrischen Schicht kann eine erste und/ oder zweite Gate - Elektrode aufgebracht sein. Die erste Gate - Elektrode und/ oder die zweite Gate - Elektrode befinden sich auf einer Seite der ferroelektrischen Schicht. Die Source - Elektrode und/oder die Drain - Elektrode befinden sich auf der gegenüberliegenden Seite der ferroelektrischen Schicht.

[0023] Eine aus Metall bestehende Drain - Elektrode kann als Substrat des synaptischen Bauteils dienen. Auf dem Substrat kann zunächst Halbleitermaterial aufgetragen sein. Oberhalb des Halbleitermaterials kann das Metall für eine Source - Elektrode aufgetragen sein. Auf der Source - Elektrode kann ferroelektrisches Material aufgetragen sein. Auf dem ferroelektrischen Material kann Metall für eine Gate - Elektrode aufgetragen sein. Eine vertikale Bauweise ist so möglich.

[0024] Es können ein oder mehrere elektrisch isolierende Schichten während der Herstellung vorgesehen werden, um ein synaptisches Bauteil auf technisch einfache Weise herzustellen. So kann eine isolierende Schicht mit Ausnehmungen auf einer halbleitenden Schicht aufgetragen werden. Durch die Ausnehmungen hindurch kann die halbleitende Schicht kontaktiert werden. Die Ausnehmungen können zumindest teilweise mit Metall beschichtet werden, um so beispielsweise Schottky - Dioden herzustellen. Die isolierende Schicht mit den Ausnehmungen trägt dazu bei, dass die beiden Elektroden elektrisch voneinander getrennt sind. Auch bei einer vertikalen Bauweise kann die Herstellung von ein oder mehreren isolierenden Schichten von Vorteil sein. Die elektrisch isolierende Schicht kann das Halbmaterial bedecken, soweit das Halbleitermaterial nicht durch metallische Elektroden kontaktiert werden soll.

[0025] Es können auf einfache Weise eine Vielzahl von synaptischen Bauteilen hergestellt werden, die elektrisch parallel und/ oder elektrisch seriell miteinander verbunden sind. Es kann eine sogenannte Crossbarstruktur hergestellt werden, die in neuronalen Netzwerken von Vorteil sein kann.

[0026] Das Halbleitermaterial kann ausgewählt sein aus: Si, Ge, SiGe, SiGeSn, GeSn, SiC. Das Halbleitermaterial kann ein III-V - Verbindungshalbleiter, II-VI - Verbindungshalbleiter sein. Das Halbleitermaterial kann ein 2D Material sein, welches also aus nur einer Lage oder nur aus wenigen Lagen von Atmen und Molekülen besteht. Das Halbleitermaterial kann ein Substrat oder eine Halbleiterschicht auf einem Substrat, wie z.B. ein „Silicon-On-Insulator“ (SOI), sein. Mit Substrat ist eine selbsttragende Schicht gemeint, die daher als Träger für andere Schichten dienen kann. Für eine Herstellung des Bauteils kann daher von einem Substrat ausgegangen werden, auf welches weitere Schichten aufgetragen werden können. Das Halbleitermaterial kann eine Halbleiterheterostruktur mit mehreren Halbleiterschichten sein.

[0027] Das ferroelektrische Material kann ausgewählt sein aus: HfO_2 basiertes Ferroelektrikum, perowskitisches Ferroelektrikum und organisches Ferroelektrikum. Das ferroelektrische Material, so zum Beispiel HfO_2 basiertes Ferroelektrikum, kann dotiert sein. Eine Dotierung kann mit ein oder mehreren der folgenden Elementen erfolgt sein: N, Al, Si, Sc, Ge, Y, Zr, Gd, Pr, Sr, Tb, La, Lu.

[0028] Das Metall für die Schottky - Diode kann ausgewählt sein aus: Al, Ag, Au, Cu, Cr, Mo, Ni, Nb, Pt, Ti, Ni, TiN, TaN, und Metalllegierungen. Das Metall für die Schottky - Diode kann eine Metallhalbleiterlegierung sein wie Silizide, Germanide, Metall-SiGeSn-Lagierungen.

[0029] Durch die Erfindung können künstliche synaptische Bauelemente basierend auf Metall / Halbleiter Schottky Barrieren bereitgestellt werden. Die Polarisierung der ferroelektrischen Schichten führt zu einer abschirmenden Ladung an der Metall / Halbleiter Grenzfläche, so dass die effektive Stärke der Schottky Barriere in dem Metall- / Halbleiter-Kontakt moduliert wird. Die Polarisationsumschaltungen in Multidomänensystemen induzieren Viellevelladungsverteilungen an der Metall-Halbleiter Grenzschicht, wodurch eine Multiebenenleitung der Diode verursacht wird. Dies kann ausgenutzt werden, um Eigenschaften von Synapsen nachzuahmen.

[0030] Die vorliegende Erfindung löst das Problem von Interfacefallen an dem Interface zwischen ferroelektrischem und halbleitendem Material in FeFETs, denn das ferroelektrische Material wird primär auf dem Metall angeordnet. Die erfindungsgemäßen ferroelektrischen Bauelemente können bei relativ geringen Temperaturen (<800°C) nach dem CMOS Prozess hergestellt werden. Dadurch sind fast alle ferroelektrischen Materialien nutzbar.

[0031] Die Erfindung liefert eine Methode zum Aufbau von künstlichen Synapsen, die nach folgendem Muster hergestellt sein können. Diese können zwei rückseitig verbundenen Metall- / Halbleiter-Schottky - Dioden umfassen, welche mit einer ferroelektrischen Lage und einer Gate - Elektrode kontaktiert sind. Dabei kann die Stärke der ferroelektrischen Schicht auf beiden Schottky - Dioden identisch oder unterschiedlich sein. Dies gilt ebenso für die Auswahl des Materials für die ferroelektrischen Schicht. Die eine Schottky - Diode kann als Signalinput fungieren, während mit der zweiten Schottky - Diode das synaptische Gewicht geregelt werden kann. Durch eine konstante Vorspannung an der zweiten Schottky - Diode kann das synaptische Gewicht auch über die Regelspannung an der ersten Schottky - Diode eingestellt werden. Es kann anstelle einer zweiten Schottky - Diode ein Metall - Halbleiter - Übergang vorhanden sein, der wie ein ohmscher Kontakt wirkt.

[0032] Zusätzliche Effekte treten bei künstlichen Synapsen mit umgepolter Vorspannung der Metall-/ Halbleiter-Schottky Diode auf, welche mit einer ferroelektrischen Schicht überzogen sind.

[0033] Hier kann die Drain - Elektrode durch einen ohmschen Kontakt an dem Halbleiter realisiert sein.

[0034] Die Erfindung betrifft außerdem ein Verfahren für den Betrieb eines erfindungsgemäßen synaptischen Bauteils. Die erste Schottky - Diode wird während des Betriebs in Sperrrichtung geschaltet wird. An die erste Gate - Elektrode wird eine elektrische Spannung pulsförmig angelegt. Das synaptische Bauteil verhält sich dann wie eine biologische Synapse.

[0035] Es zeigen

Fig. 1: Funktionsprinzip eines neuronalen Gates;

Fig. 2a: Ausführungsform einer Synapse;

Fig. 2b: Symboldarstellung der Synapse nach **Fig. 2a**;

Fig. 3: Ausführungsform einer Synapse;

Fig. 4a: Modulation einer Schottky - Diode durch eine positive Gate - Spannung;

Fig. 4b: Modulation einer Schottky - Diode durch eine negative Gate - Spannung;

Fig. 5a: Bändermodell einer Schottky - Diode bei positiver Gate - Spannung;

Fig. 5b: Bändermodell einer Schottky - Diode bei negativer Gate - Spannung;

Fig. 6a: Strom - Spannungskurve;

Fig. 6b: Ausführungsform einer Synapse;

Fig. 7: Puls - Strom - Diagramm;

Fig. 8a: Ausführungsform für eine Mehrzahl von Synapsen

Fig. 8b: Schnittdarstellung aus **Fig. 8a**;

Fig. 9a: Ausführungsform einer Synapse;

Fig. 9b: Symboldarstellung der Synapse aus **Fig. 9a**;

[0036] **Fig. 1** zeigt das Funktionsprinzip eines neuronalen Gates, welches aus mehreren Eingangssynapsen x_1 bis x_n und einem Neuron besteht. Die Eingangssignale der Synapsen x_i mit den Gewichten w_i werden mit folgender Funktion integriert:

$$S = \sum_{i=1}^{n} x_i w_i + \theta$$

S ist hier die Integration über die Eingangssignale mit den zugehörigen Gewichten und θ ist ein Offset. Die neuronale Funktion f(s) wirkt als Schwellwertfunktion. Sobald S einen Schwellwert erreicht, wird das Neuron mit der Funktion f(s) aktiviert.

[0037] **Fig. 2** zeigt eine erste Ausführungsform einer Synapse. Die Synapse umfasst eine Schicht **101**, die aus einem Halbleiter besteht. Auf der halbleitenden Schicht **101** befinden sich eine Source - Elektrode **102** und eine Drain - Elektrode **103**. Die beiden Elektroden **102**, **103** sind räumlich voneinander getrennt. Die beiden Elektroden **102**, **103** können angrenzend an die Stirnseiten der halbleitenden Schicht **101** vorhanden sein. Die beiden Elektroden **102**, **103** bestehen aus Metall. Die beiden Elektroden **102**, **103** können schichtförmig sein. Ein elektrisches Potential V_S kann an die Source-Elektrode **102** angelegt werden. Ein elektrisches Potential V_D kann an die Drain-Elektrode **103** angelegt werden. Das elektrische Potential V_S unterscheidet sich von dem elektrischen Potential V_D.

[0038] Das Metall der Source-Elektrode **102** und das Halbleitermaterial der halbleitenden Schicht **101** sind so ausgewählt, dass der Übergang zwischen der Source-Elektrode **102** und der halbleitenden Schicht **101** ein Schottky - Kontakt ist. Es liegt also eine erste Schottky - Diode vor, die durch die Source-Elektrode **102** und die halbleitende Schicht **101** gebildet wird.

[0039] Das Metall der Drain-Elektrode **103** und das Halbleitermaterial der halbleitenden Schicht **101** können so ausgewählt sein, dass der Übergang zwischen der Drain-Elektrode **103** und der halbleitenden Schicht **101** ein Schottky - Kontakt ist. Die Drain-Elektrode **103** und die halbleitende Schicht **101** können also eine zweite Schottky - Diode bilden.

[0040] Die erste Schottky-Diode und die zweite Schottky-Diode sind in einer Ersatzschaltung „back-to-back“ geschaltet. Eine Potentialdifferenz zwischen dem elektrischen Potential V_S und dem elektrischen Potential V_D hat daher zur Folge, dass eine Schottky - Diode in Sperrrichtung geschaltet ist und die andere Schottky - Diode in Durchlassrichtung.

[0041] Es kann aufgrund der Potentialdifferenz zwischen dem elektrischen Potential V_S und dem elektrischen Potential V_D ein elektrischer Strom von der Source-Elektrode **102** zur Drain-Elektrode **103** fließen. Fließt ein elektrischer Strom von der Source - Elektrode **102** zur Drain - Elektrode **103**, so passiert der elektrische Strom die erste Schottky - Diode in Sperrrichtung und die zweite Schottky - Diode in Durchlassrichtung. Das Fließen des elektrischen Stroms in Sperrrichtung kann erfolgen, indem Elektronen die Sperrschicht der ersten Schottky - Diode durchtunneln. Fließt der elektrische Strom in Durchlassrichtung durch die zweite Schottky - Diode, so wirkt die zweite Schottky - Diode wie ein ohmscher Widerstand.

[0042] Oberhalb der Source - Elektrode **102** befindet sich eine erste ferroelektrische Schicht **104a**. Die erste ferroelektrische Schicht **104a** kann einen Teil der Source - Elektrode **102** überdecken. Die erste ferroelektrische Schicht **104a** überlappt mit der halbleitenden Schicht **101**.

[0043] Oberhalb der Drain - Elektrode **103** befindet sich eine zweite ferroelektrische Schicht **104b**. Die zweite ferroelektrische Schicht **104b** überdeckt einen Teil der Source - Elektrode **103**. Die zweite ferroelektrische Schicht **104b** überlappt mit der halbleitenden Schicht **101**.

[0044] Auf der ersten ferroelektrischen Schicht **104a** befindet sich eine erste Elektrode **105a**. Auf der zweiten ferroelektrischen Schicht **104b** befindet sich eine zweite Elektrode **105b**. Beide Elektroden **105a** und **105b** können aus Metall bestehen.

[0045] Die Synapse ist so eingerichtet, dass an die erste Elektrode **105a** ein elektrisches Potential V_{g1} angelegt werden kann. Durch ein angelegtes elektrisches Potential V_{g1} kann die Schottky-Barriere der ersten Schottky - Diode moduliert werden. Die Synapse ist so eingerichtet, dass an die zweite Elektrode **105a** ein elektrisches Potential V_{g2} angelegt werden kann. Durch ein angelegtes elektrisches Potential V_{g2} kann die Schottky-Barriere der zweiten Schottky - Diode moduliert werden.

[0046] Das erste elektrische Potential V_{g1} kann als synaptisches Eingangssignal innerhalb eines neuronalen Netzwerks aufgefasst werden. Das zweite elektrische Potential V_{g2} kann zur Regelung von Gewichten innerhalb eines neuronalen Netzwerks verwendet werden.

[0047] Die ferroelektrischen Schichten **104a** und/oder **104b** können Bereiche der Elektroden **102** und **103** überlappen, die auf der halbleitenden Schicht **101** aufgebracht sind. Es kann so die Herstellung erleichtert werden. Auch können die Schottky - Barrieren der ersten und zweiten Schottky - Dioden kontrollierter moduliert werden.

[0048] Die **Fig. 2b** zeigt ein elektrisches Symbol der in der **Fig. 2a** gezeigte Synapse mit der Source - Elektrode S und der Drain - Elektrode D.

[0049] In der **Fig. 3** wird eine zweite Ausführungsform einer Synapse gezeigt, die anstelle von zwei ferroelektrischen Schichten **204a** und **204b** nur eine durchgehende ferroelektrische Schicht **204** aufweist. Darüber hinaus verfügt die hier gezeigte Synapse über eine Schicht **201**, die aus einem Halbleiter besteht. Auf der halbleitenden Schicht **201** befinden sich wie im Fall der **Fig. 2a** eine Source - Elektrode **202** und eine Drain - Elektrode **203**. Das Metall der Source-Elektrode **202** und das Halbleitermaterial der halbleitenden Schicht **201** sind so ausgewählt, dass der Übergang zwischen der Source - Elektrode **202** und der halbleitenden Schicht **201** ein Schottky - Kontakt ist. Das Metall der Drain - Elektrode **203** und das Halbleitermaterial der halbleitenden Schicht **201** können so ausgewählt sein, dass der Übergang zwischen der Drain-Elektrode **203** und der halbleitenden Schicht **201** ein Schottky - Kontakt ist. Auf der ferroelektrischen Schicht **204** befinden sich eine erste Elektrode **205a** und eine zweite Elektrode **205b**. Das elektrische Symbol der **Fig. 2b** kann auch die in der **Fig. 3** gezeigte Synapse repräsentieren.

[0050] Die **Fig. 4a** und **Fig. 4b** verdeutlichen das Modulieren der Schottky - Barrieren durch Anlegen eines elektrischen Potentials V_{gi}, wobei V_{gi} mit i = 1 oder i =2. **Fig. 4a** zeigt den Fall, dass eine an der Elektrode **305** angelegte Spannung bzw. angelegtes elektrisches Potential positiv ist. Die Polarisation des Ferroelektrikums verursacht nichtflüchtige Speichereffekte, so dass Elektronen in der Halbleiterschicht **301** vorhanden sind. Die **Fig. 4b** verdeutlicht die Situation, wenn eine negative Spannung V_{gi} an die erste bzw. zweite Elektrode **305** angelegt wird, wobei positive Ladungen (Löcher) in der Halbleiterschicht **301** aufgrund polarisationsbedingter nichtflüchtiger Speichereffekte vorhanden sind. Die Dicke einer Schottky - Barriere kann folglich durch Anlegen von Potentialen V_{gi} moduliert werden. Dies wirkt sich auf das Fließen von elektrischen Tunnelströmen aus.

[0051] **Fig. 5** verdeutlicht anhand des Bändermodells eine Modulierung einer Schottky Barriere von der in der Figur gezeigten Metallschicht **302** zu der n-Typ dotierten halbleitenden Schicht **301**. Wenn eine positive Spannung V_{gi} angelegt wird, wie es in **Fig. 4a** gezeigt wird, werden mehr Elektronen werden an der Metall-Halbleiter-Grenzschicht erzeugt. Die Bandkrümmung (gestrichelte Linie) wird verstärkt. Es resultiert eine kleinere Schottky Barriere. Dies verursacht entlang des Pfeils eine höhere Tunnelstromdichte, welche wie folgt formuliert werden kann:

$$J_t \sim \exp\left(-\frac{q\varnothing_{bn}}{\sqrt{N_D}}\right)$$

[0052] Hier ist $\varnothing_{bn}$ ist die Höhe der Schottky Barriere für die Elektronen. q ist die Ladung der Elektronen. N_D ist die Dotierungskonzentration an der Oberfläche des Halbleiters **301**.

[0053] Wird die in der **Fig. 4b** gezeigt eine negative Spannung V_{gi}, bewirkt die Verarmung ein kleineres N_D und damit eine breitere Schottky Barriere. Eine kleinere Stromdichte entlang des Pfeils ist die Folge. So kann durch die Modulation der Multidomänenpolarisation des Ferroelektrikums die Dotierungskonzentration in der Metall-Halbleiter-Grenzschicht reguliert werden und damit die Leitfähigkeit der Schottky Diode.

[0054] Für einen p-Typ dotierten Halbleiter zeigt die Polarisation und die Vorspannung in die entgegengesetzte Richtung. Die Schottky Barriere ist $\varnothing_{bp}$.

[0055] **Fig. 6a** präsentiert ein Beispiel für eine Messung eines elektrischen Stroms I_D als Funktion von V_{g1} von einer Source - Elektrode **402** zu einer Drain - Elektrode **403**. An der Drain - Elektrode lag ein Potential von -0,5 Volt an. Die durchgezogene Linie zeigt die Messkurven, die bei einer Spannung V_{g2} = -1V ermittelt wurden. Die gestrichelte Linie zeigt die Mess-

kurven, die bei einer Spannung V_{g2} = +1V ermittelt wurden. Die Strom-Spannungskennlinie I_d - V_{g1} in der **Fig. 6a** zeigt eine Hysterese gegen den Uhrzeigersinn. Diese ist typisch für ferroelektrische Materialien. Es wird also durch das ferroelektrische Material ein für eine Synapse gewünschter Memoryeffekt erzielt. Durch die Änderung der Spannung V_{g2} wird der anfängliche Strom ebenfalls beeinflusst. Dies demonstriert die Gewichtefunktion von V_{g2} einer Synapse.

[0056] Die in der **Fig. 6a** gezeigten Messkurven wurden mit dem in der **Fig. 6b** gezeigten Bauteil durchgeführt. Eine dünne p-dotierte Siliziumschicht ist durch eine isolierende Schicht von einem Si Substrat getrennt. Dies wird Silicon-on-Insulator genannt und mit SOI abgekürzt. Die isolierende Schicht wird durch „vergrabenes Siliziumoxid“ gebildet, die auch buried silicon oxide oder BOX genannt wird. Die Source - Elektrode **402** und die Drain - Elektrode **403** aus einkristallinem $NiSi_2$ gebildet. Die Schichten **402** und **403** sind durch Silizidierung an sehr dünnem Ni auf die dünne, p-dotierte Siliziumschicht **401** aufgetragen. Die Schicht **401** ist 55 nm dick und ist gering p-dotiert. HfZrO wurde als ferroelektrische Schicht **404** abgeschieden und zwar durch ALD (Atomic Layer Deposition). Die Schichtdicke der ferroelektrischen Schicht **404** kann 3 bis 30 nm betragen. Die erste Elektrode **405a** und die zweite Elektrode **405b** sind aus TiN hergestellt. Die erste Elektrode **405a** und die zweite Elektrode **405b** dienen als Gate - Elektroden.

[0057] Die **Fig. 7** zeigt ein Beispiel für die gemessene synaptische Kennlinie des Bauelements aus **Fig. 6** unter dem Einfluss eines gepulsten Signals am ersten Gate, also an der ersten Gate - Elektrode 405a. Aufgetragen ist der Strom ID gegen die Pulsanzahl PN. An der ersten Gate - Elektrode wurde also eine Spannung V_{g1} pulsförmig angelegt. Wie in der **Fig. 7** angedeutet, wird eine Langzeit - Potenzierung (LTP) durch positiv gepulste Signale erzeugt. Eine Langzeit - Depression (LTD) wird durch negativ gepulste Signale erzeugt werden.

[0058] In den **Fig. 8a** und **Fig. 8b** sind mehrere Synapsen mit einer Crossbarstruktur abgebildet. Eine Querschnittsansicht von A nach A' aus der **Fig. 8a** wird in **Fig. 8b** gezeigt. Zwei Schottky - Dioden einer Synapse weisen eine gemeinsame halbleitende Schicht **501** auf. Eine Metallschicht **502a** der ersten Schottky - Diode dient als Source - Elektrode. Eine Metallschicht **502b** dient als Drain - Elektrode. Zur Herstellung wurde zunächst auf der halbleitenden Schicht eine elektrisch isolierende Schicht **505** so gefertigt, dass zwei Zugänge zu der halbleitenden Schicht verbleiben. Anschließend wurden die beiden Schichten **502a** und **502b** so hergestellt, dass diese voneinander elektrisch getrennt sind. Es wurden dann die gezeigten ferroelektrischen Schichten **502a** und **502b** mit den Gate - Elektroden **504a** und **504b** hergestellt. Es können bei diesem Aufbau vorteilhaft konventionelle Herstellungstechniken verwendet werden, um eine Vielzahl von Synapsen in Form einer Crossbarstruktur auf technisch einfache Weise herzustellen.

[0059] **Fig. 9** zeigt ein Beispiel für eine Synapse, welches eine ersten Schottky - Diode umfasst. Die Schottky - Diode umfasst eine aus Metall bestehende Drain - Elektrode **602**. Die aus Metall bestehende Drain - Elektrode **602** ist auf einer Halbleiterschicht **601** aufgebracht. Die erste Schottky - Diode kann durch eine ferroelektrische Schicht **604** mit einer Gate - Elektrode **605** erfindungsgemäß mit Hilfe einer Spannung V_g moduliert werden. Eine zweite Schottky - Diode mit der halbleitenden Schicht **601** und der aus Metall bestehenden Drain - Elektrode **603** kann vorhanden sein. Diese kann mit einer Vorspannung V_D in Flussrichtung betrieben werden. Die halbleitende Schicht **601** und die aus Metall bestehende Drain - Elektrode **603** müssen aber nicht so gewählt sein, dass eine zweite Schottky - Diode vorhanden ist. Stattdessen können die halbleitende Schicht **601** und die aus Metall bestehende Drain - Elektrode **603** ein ohmscher Kontakt sein.

[0060] Die erste Schottky - Diode **602**, **601** wird unter einer Sperrvorspannung betrieben. Dieses synaptische Bauelement arbeitet wie ein Einzelgatetransistor, welcher durch das Symbol aus **Fig. 9b** dargestellt werden kann.

[0061] **Fig. 10** zeigt ein synaptisches Bauelement in einer vertikalen Anordnung. Eine aus Metall bestehende Schicht **701** kann als Substrat dienen. Die aus Metall bestehende Schicht **701** kann aber auch auf einem Substrat aufgebracht worden sein. Die aus Metall bestehende Schicht **701** dient als Drain - Elektrode. Die aus Metall bestehende Schicht **701** ist daher so eingerichtet, dass diese mit einer Spannung V_D verbunden werden kann. Auf der aus Metall bestehenden Schicht **701** ist eine halbleitende Schicht **702** aufgebracht. Die aus Metall bestehende Schicht **701** und die halbleitende Schicht **702** können eine Schottky - Diode sein. Auf der halbleitenden Schicht ist eine Isolator Schicht **703a**, **703b** so aufgebracht worden, dass ein Zugang zur halbleitenden Schicht **702** auf der Oberseite verblieben ist. Der Zugang kann auch nachträglich nach der Abscheidung der isolierenden Schicht **703a**, **703b** geschaffen worden sein, so zum Beispiel durch Ätzen. Auf der Oberseite wurde im Anschluss daran eine metallische Schicht **704** abgeschieden. Diese kontaktiert durch den Zugang hindurch die halbleitende Schicht **702**. Die metallische Schicht **704** dient als Source - Elektrode. Diese kann daher mit einer Spannung V_S verbunden werden. Die metallische Schicht **704** und die halbleitende Schicht **702** bilden eine Schottky - Diode. Auf der metallischen Schicht **704** wurde eine ferroelektrische Schicht **705** abgeschieden. Auf der ferroelektrischen Schicht **705** wurde eine metallische Schicht **706** ab-

geschieden. Die metallische Schicht **706** dient als Gate - Elektrode. Diese kann daher mit einer Spannung V_G verbunden werden.

[0062] Die in der **Fig. 10** gezeigte Struktur kann um 180° gedreht werden. Diese in der **Fig. 10** gezeigte Struktur ist C2 rotationsinvariant.

[0063] Die **Fig. 11a** und **Fig. 11b** symbolisieren ein neuronales Bauelement mit einer erfindungsgemäßen Synapse, wobei ein Transistor und ein Widerstand vorhanden sind. Der Transistor kann entweder ein Doppelgatetransistor **801** oder ein Einzelgatetransistor **803** sein. Diese Transistoren repräsentieren ein synaptisches Bauelement. Die Wiederstände **802** und **804** fungieren als pull-up / pull-down Wiederstände. Durch die Anpassung der Leitfähigkeit der Wiederstände kann die Aktivierung eines Neurons angepasst werden.

[0064] **Fig. 12** stellt ein neuronales Netzwerk mit mehreren erfindungsgemäßen Synapsen und mit konventionellen CMOS Neuronen dar. Die Synapsen werden in der Transistorendarstellung X_1, W_1, ..., X_n, W_n auf der linken Seite gezeigt. Rechts davon wird ein konventionelles neuronales Bauelement dargestellt. Die Synapse kann ein Einzelgatebauelement, wie es in **Fig. 9** und **Fig. 10** dargestellt ist, sein. Die Herstellung der Synapsen kann nach dem CMOS Neuronenverfahren erfolgen, um die Hochtemperaturbehandlung während des CMOS Prozesses zu vermeiden. Erfindungsgemäße Synapsen können mit konventionellen Neuronen kombiniert werden, was durch die **Fig. 12** verdeutlicht wird.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- CN 208922326 U [0004]
- WO 2019147859 A2 [0005]
- EP 0529565 B1 [0005]
- US 2019164597 A1 [0005]

Patentansprüche

1. Synaptisches Bauteil für ein neuronales Netzwerk mit einer Schicht aus einem Halbleiter (101, 201) und einer Source - Elektrode (102, 202), die mit der halbleitenden Schicht (101, 201) verbunden ist, und einer Drain - Elektrode (103, 203), die mit der halbleitenden Schicht (101, 201) verbunden ist, wobei die Source - Elektrode (102, 202) von der Drain - Elektrode (103, 203) räumlich getrennt ist, wobei die Source - Elektrode (102, 202) und die halbleitende Schicht (101, 201) eine erste Schottky - Diode bilden, wobei die Source - Elektrode (102, 202) von einer ersten Gate - Elektrode (105a, 205a) durch ferroelektrisches Material (104a, 104b, 204) getrennt ist.

2. Bauteil nach dem vorhergehenden Anspruch, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Drain - Elektrode (103, 203) mit der halbleitenden Schicht (101, 201) eine zweite Schottky - Diode bilden.

3. Bauteil nach einem vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Drain - Elektrode (103, 203) von einer zweiten Gate - Elektrode (105b, 205b) durch ferroelektrisches Material (104b, 204) getrennt ist und wobei die erste Gate - Elektrode (105a, 205a) von der zweiten Gate - Elektrode (105b, 205b) räumlich getrennt ist.

4. Bauteil nach dem vorhergehenden Anspruch, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich die Source - Elektrode (102, 202) und die Drain - Elektrode (103, 203) auf einer Seite der halbleitenden Schicht (101, 201) und/oder bei gegenüberliegenden Enden der halbleitenden Schicht (101, 201) befinden.

5. Bauteil nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich die halbleitende Schicht (401) oberhalb eines Substrats befindet oder dass die halbleitende Schicht ein Substrat (601) ist.

6. Bauteil nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die halbleitende Schicht (101, 201, 401) eine Halbleiterheterostruktur ist.

7. Bauteil nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ferroelektrisches Material als Schicht (104a, 104b, 204) vorliegt, die sich zumindest teilweise auf der halbleitenden Schicht (101, 201) befindet.

8. Bauteil nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ferroelektrisches Material als Schicht (104a, 104b, 204) vorliegt, die sich zumindest teilweise auf der Source-Elektrode (102, 202) und/oder der Drain - Elektrode (103, 203) befindet.

9. Bauteil nach den beiden vorhergehenden Ansprüchen, **dadurch gekennzeichnet**, dass das ferroelektrische Material als eine einzige Schicht (204) vorliegt, die sich sowohl zumindest teilweise auf der Source - Elektrode (102, 202) als auch zumindest teilweise auf der Drain - Elektrode (103, 203) befindet.

10. Bauteil nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ferroelektrisches Material als Schicht (104a, 104b, 204) vorliegt und sich die erste Gate - Elektrode (105a, 205a) und/ oder die zweite Gate - Elektrode (105b, 205b) auf einer Seite der ferroelektrischen Schicht (104a, 104b, 204) befinden und die Source - Elektrode (102, 202) und/oder die Drain - Elektrode (103, 203) sich auf der gegenüberliegenden Seite der ferroelektrischen Schicht (104a, 104b, 204) befinden.

11. Bauteil nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Bauteil mit wenigstens einem weiteren Bauteil nach einem der vorhergehenden Ansprüche elektrisch seriell oder elektrisch parallel zur Bildung einer Crossbarstruktur verbunden ist.

12. Bauteil nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das ferroelektrische Material ausgewählt ist aus: dotierten HfO_2 Ferroelektrikum, , einem Perowskit Ferroelektrikum, einem organischen Ferroelektrikum.

13. Bauteil nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Metall für eine Schottky - Diode ausgewählt ist aus: Al, Ag, Au, Cu, Cr, Mo, Ni, Nb, Pt, Ti, Ni, TiN, TaN, oder einer Metallhalbleiterlegierung wie Silizide, Germanide, Metall-SiGeSn-Legierungen.

14. Bauteil nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die halbleitende Schicht (501) teilweise mit einer Schicht aus elektrisch isolierendem Material (505, 703a, 703b) abgedeckt ist.

15. Neuronales Netzwerk umfassend ein synaptisches Bauteil nach einem der vorhergehenden Ansprüche und ein Neuron, das mit dem synaptischen Bauteil elektrisch verbunden ist.

16. Verfahren für den Betrieb eines synaptischen Bauteils nach einem der vorhergehenden Anschlüsse, indem die erste Schottky - Diode (101, 102; 201, 202) in Sperrrichtung geschaltet wird und an die erste Gate - Elektrode (105a, 205a) eine elektrische Spannung (V_{g1}) pulsförmig angelegt wird.

Es folgen 9 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

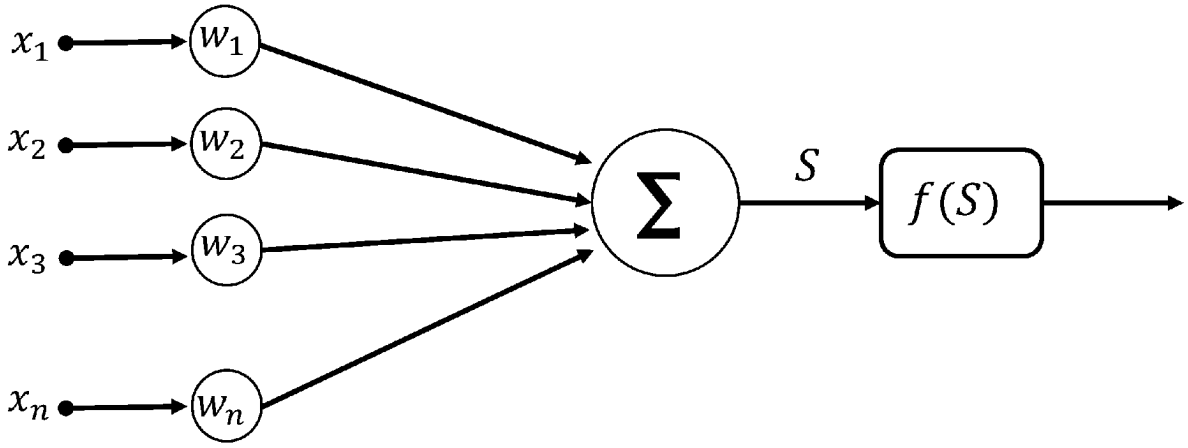


FIG. 1

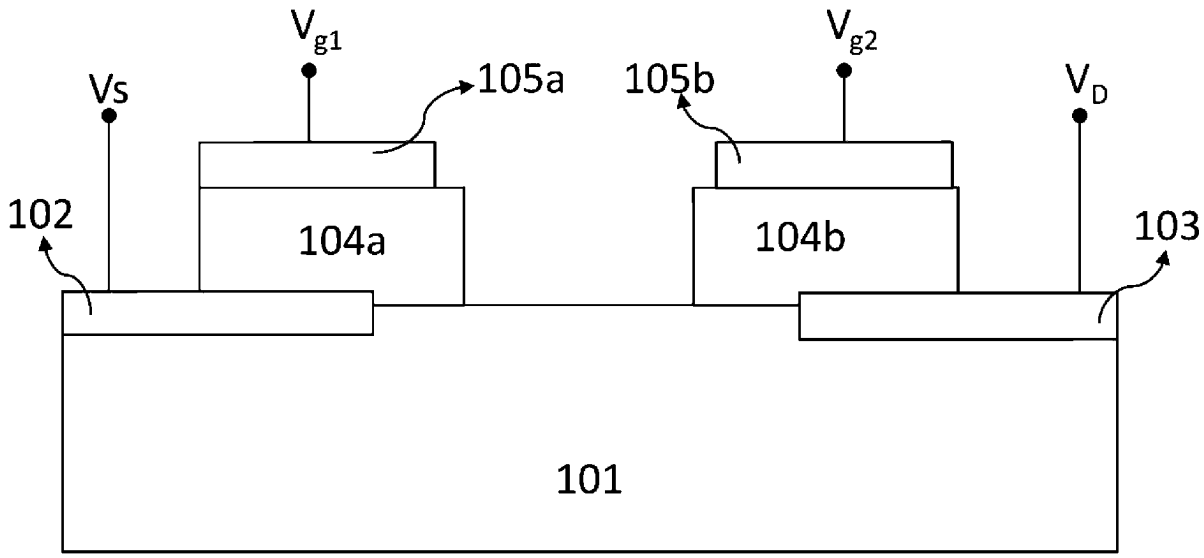


FIG. 2a

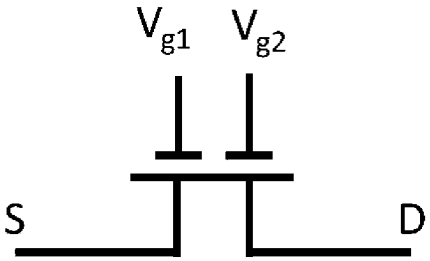


FIG. 2b

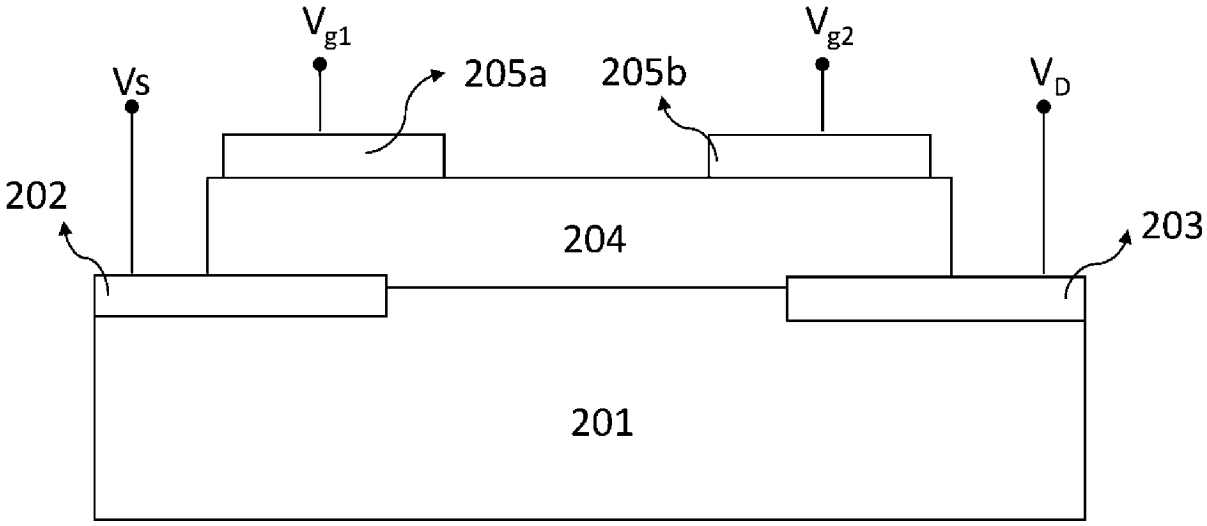


FIG. 3

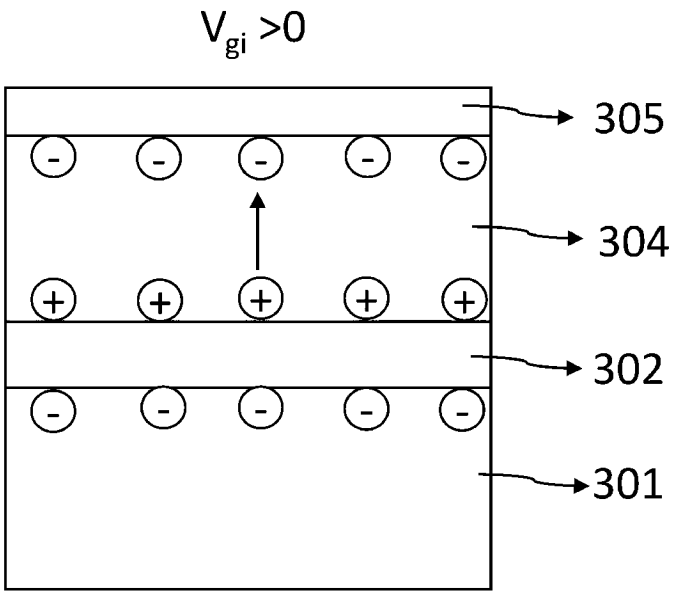


FIG. 4a

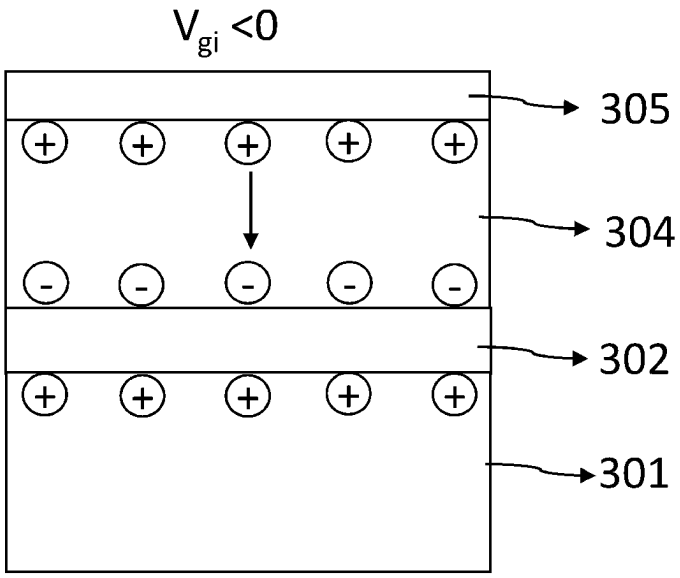


FIG. 4b

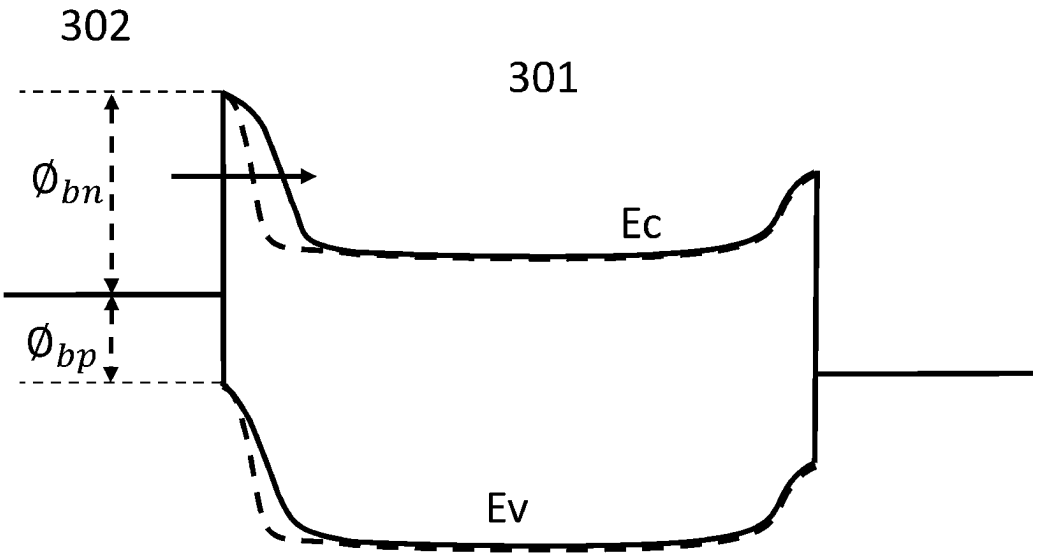


FIG. 5a

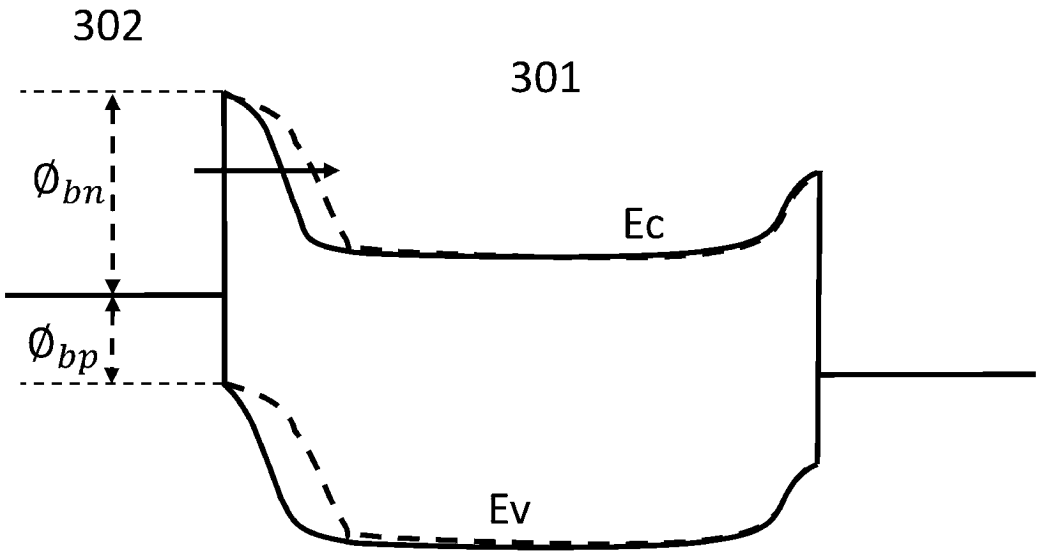

302
301
$\emptyset_{bn}$
$\emptyset_{bp}$
Ec
Ev

FIG. 5b

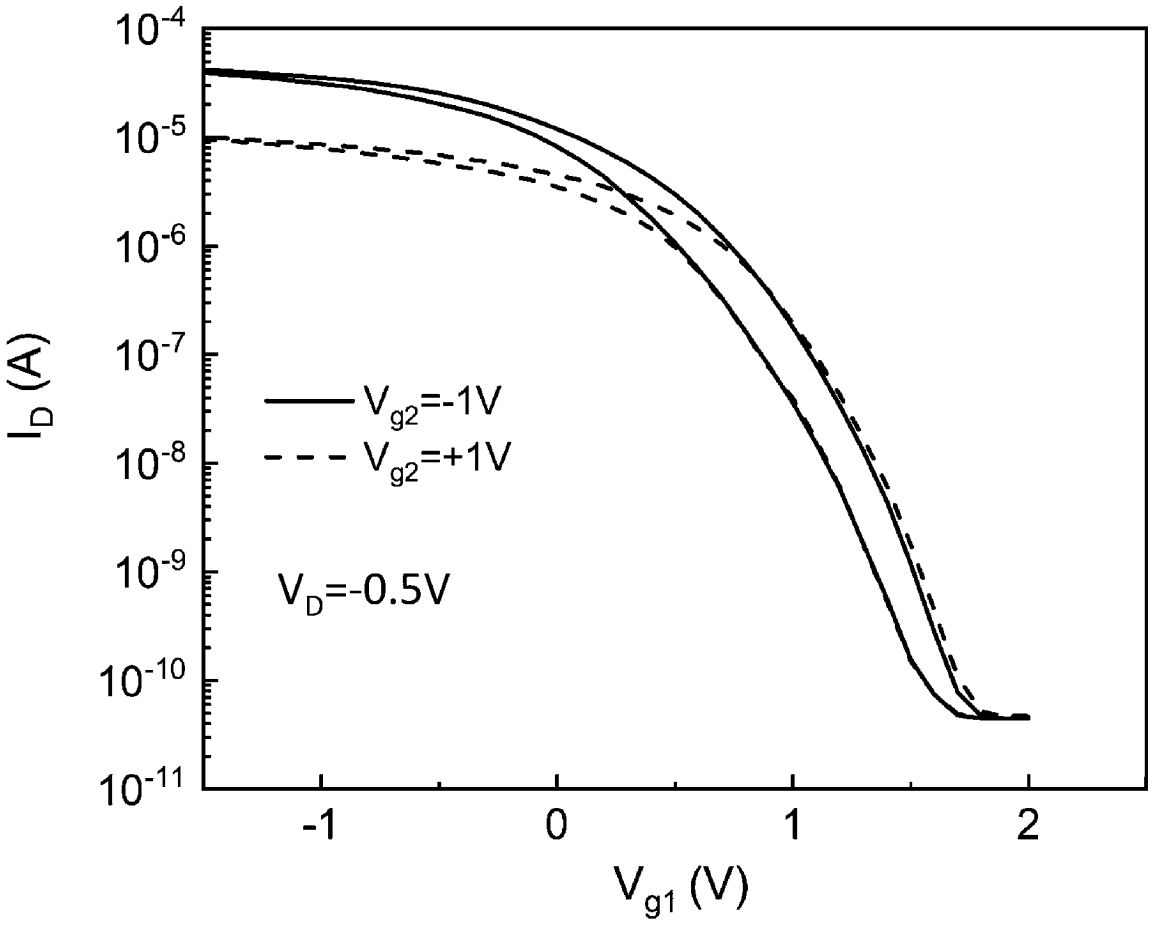

10^{-4}
10^{-5}
10^{-6}
10^{-7}
10^{-8}
10^{-9}
10^{-10}
10^{-11}
I_D (A)
V_{g2}=-1V
V_{g2}=+1V
V_D=-0.5V
-1
0
1
2
V_{g1} (V)

FIG. 6a

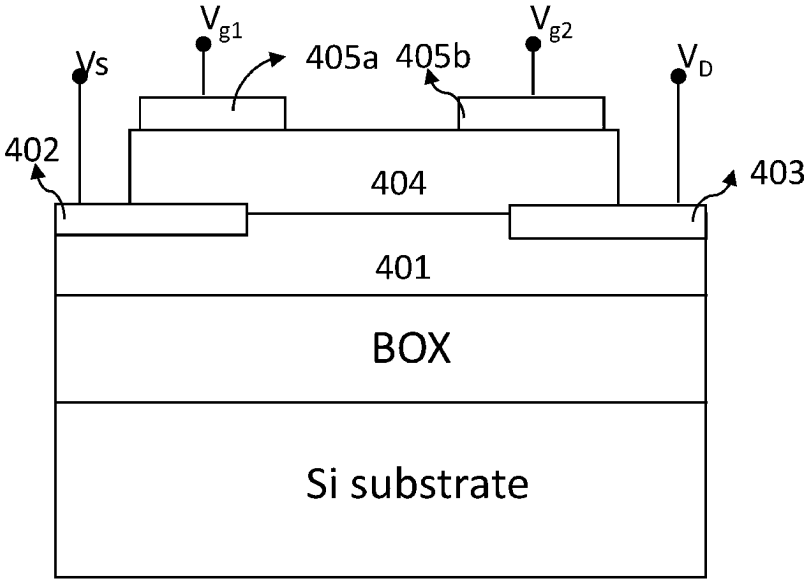

V_{g1}
V_{g2}
Vs
405a
405b
V_D
402
404
403
401
BOX
Si substrate

FIG. 6b

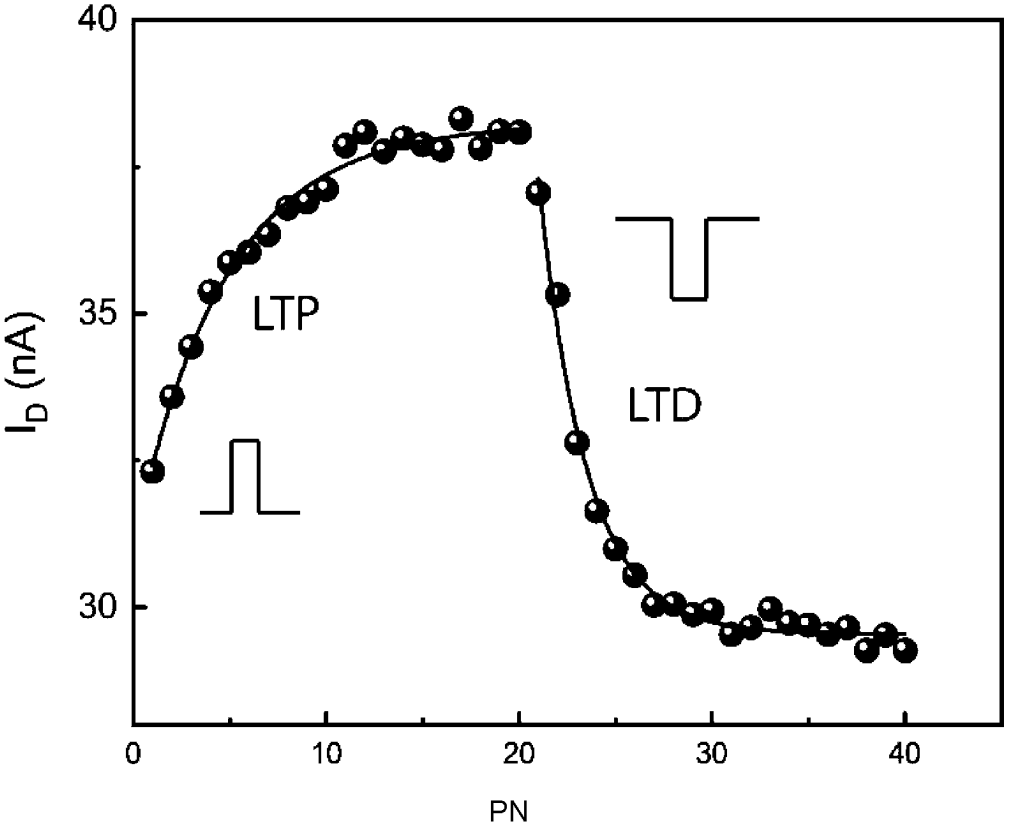

40
35
30
I_D (nA)
LTP
LTD
0
10
20
30
40
PN

FIG. 7

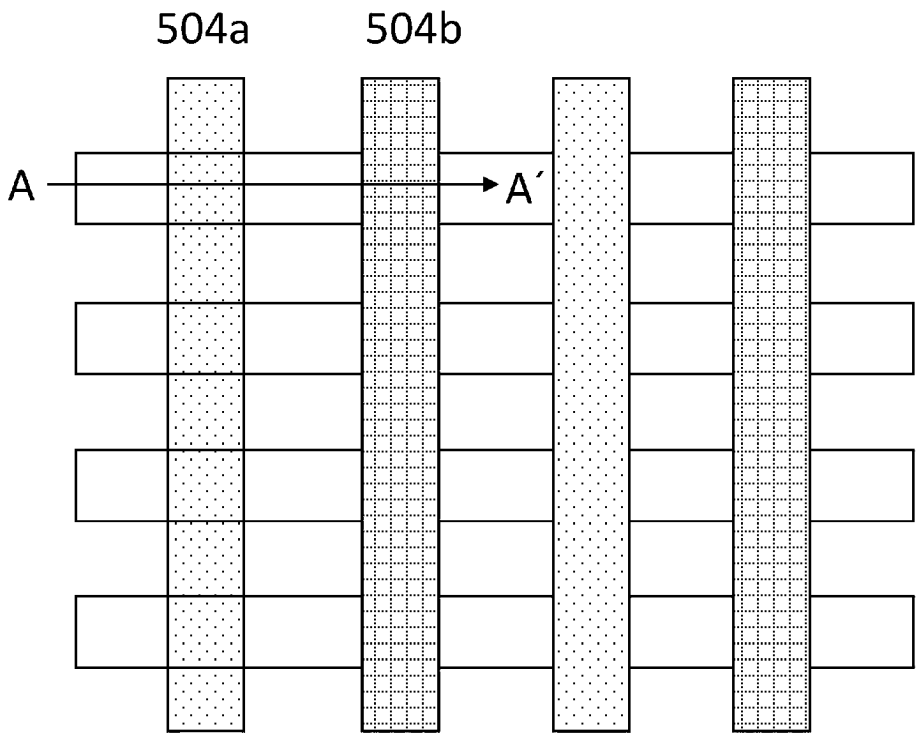


FIG. 8a

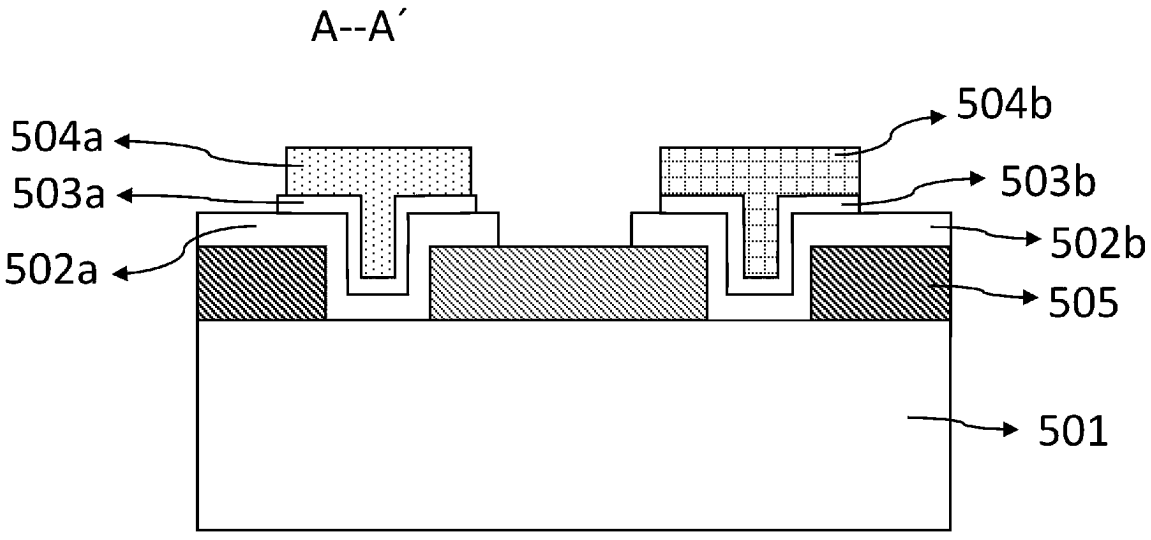


FIG. 8b

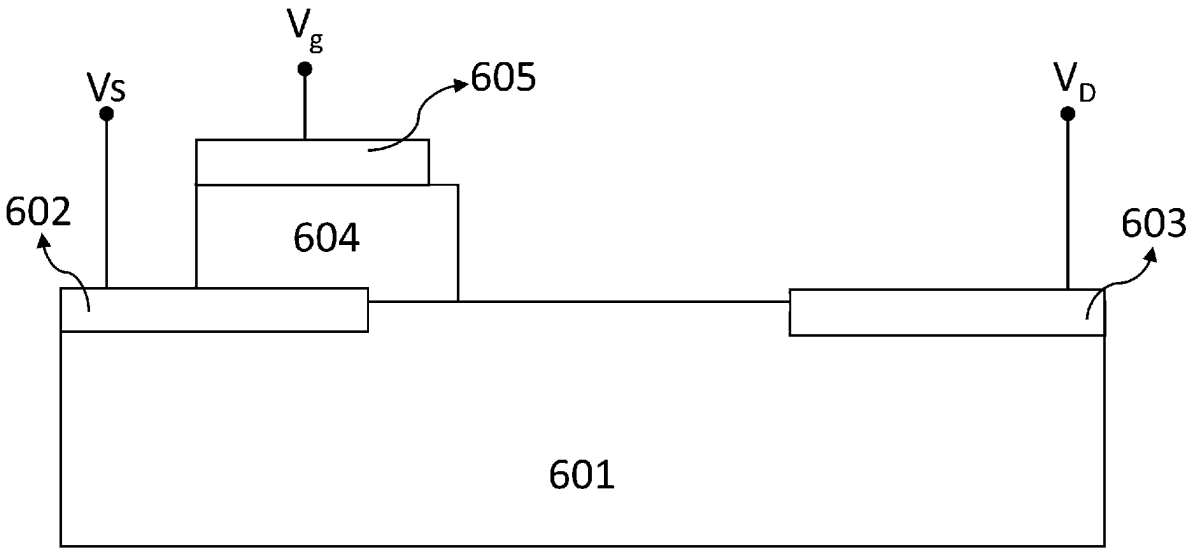


FIG. 9a

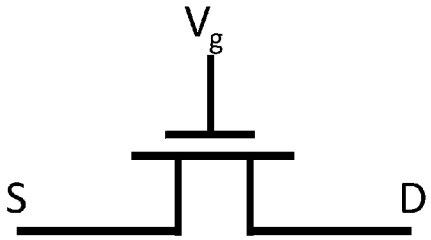


FIG. 9b

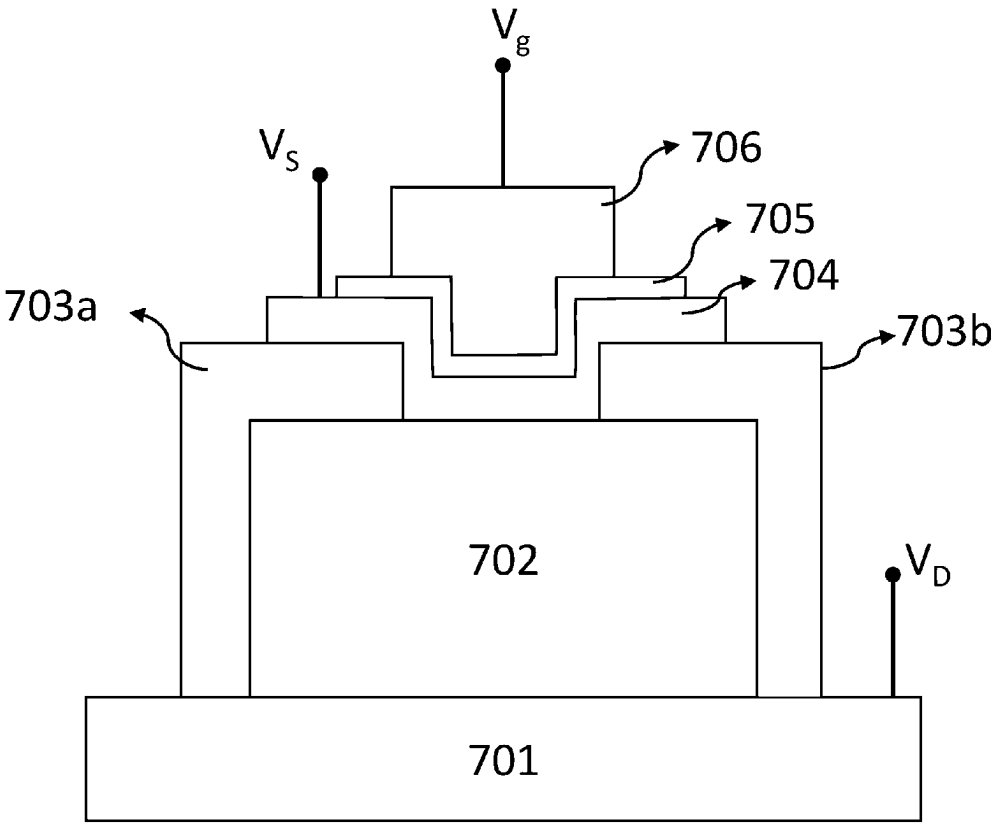


FIG. 10

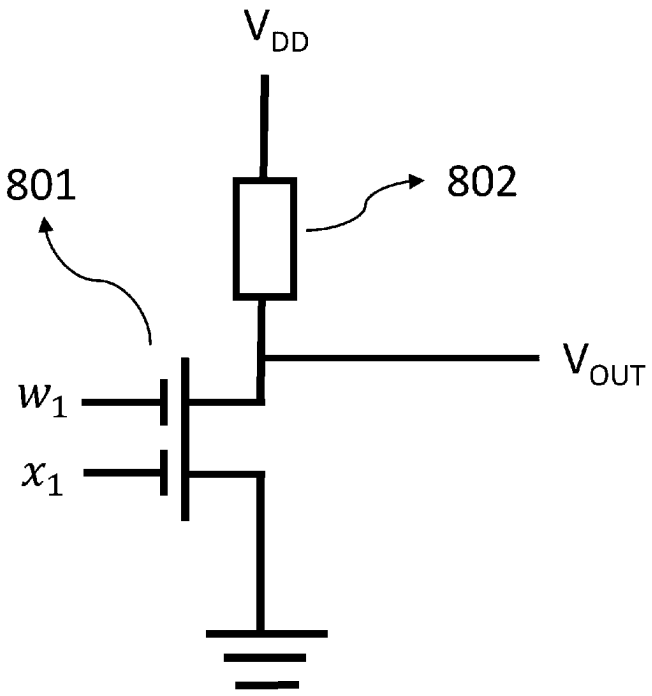


FIG. 11a

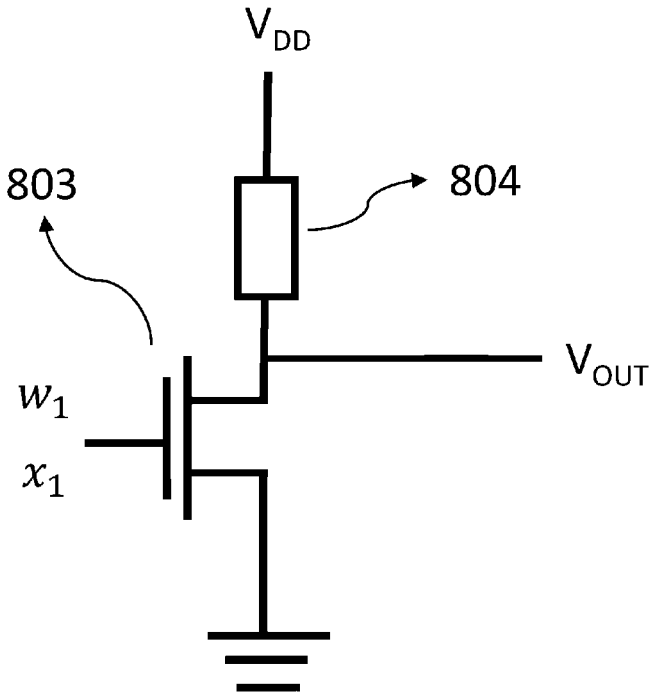


FIG. 11b

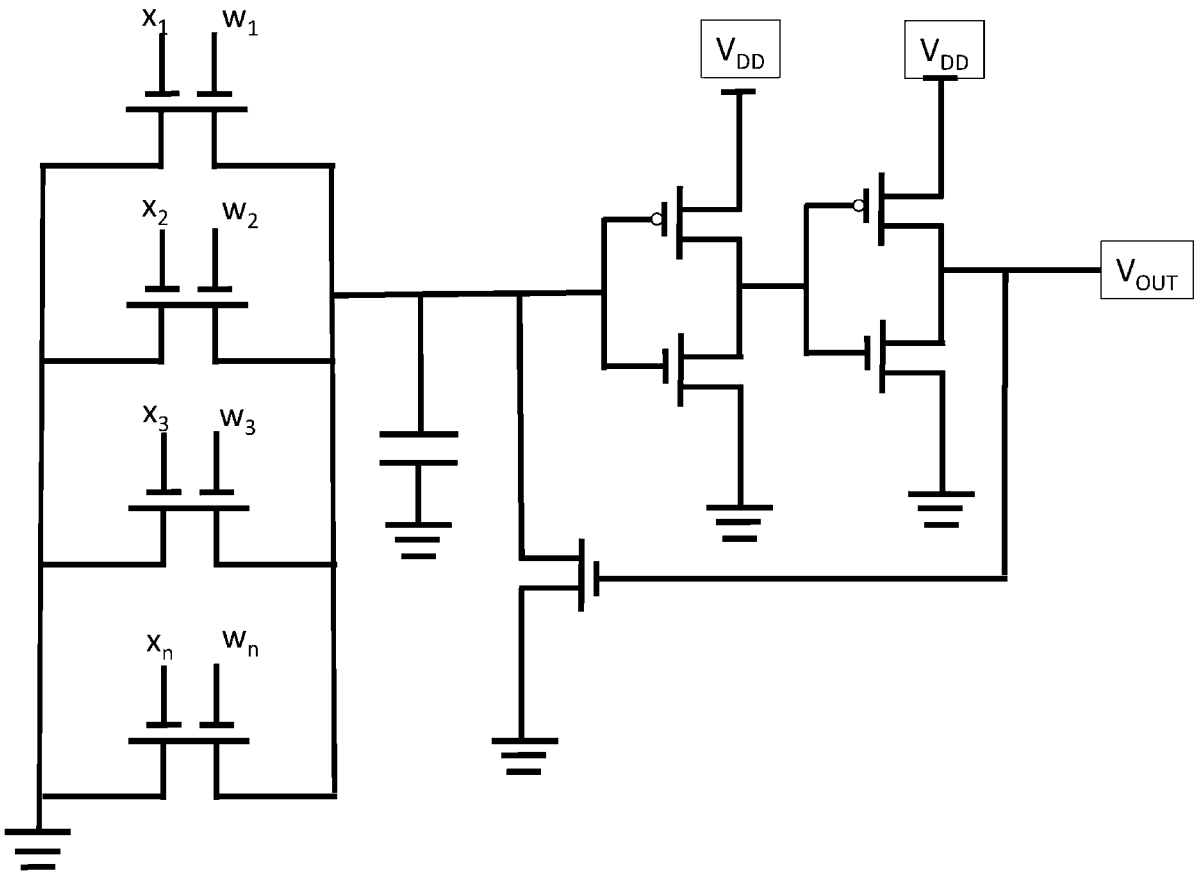


FIG. 12

 Das Dokument wurde durch die Firma Jouve hergestellt.