



**H01L 29/786** (2006.01).  
**H01L 29/772** (2006.01).  
**H01L 21/335** (2006.01).  
**H01L 21/8232** (2006.01).  
**H01L 27/085** (2006.01)

(12)

## BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: **a 2010 01130**

(22) Data de depozit: **18.11.2010**

(45) Data publicării mențiunii acordării brevetului: **30.08.2013** BOPI nr. **8/2013**

(41) Data publicării cererii:  
**28.10.2011** BOPI nr. **10/2011**

(73) Titular:  
• **UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN  
BUCUREȘTI, SPLAIUL INDEPENDENȚEI  
NR.313, SECTOR 6, BUCUREȘTI, B, RO**

(72) Inventatori:  
• **RAVARIU CRISTIAN,  
STR.IZVORUL CRIȘULUI NR.15, BL.A 8,  
SC.F, ET.2, AP.83, SECTOR 4,  
BUCUREȘTI, B, RO**

(56) Documente din stadiul tehnicii:  
**US 2006208342 A1; US 2005127466 A1;  
JP 2006245604 A; US 2002009859 A1;  
WO 2005083775 A1**

(54) **TRANZISTOR CU EFECT DE CÂMP DE TIP CAVITATE PE  
IZOLATOR ȘI PROCEDURE DE REALIZARE A ACESTUIA**



# RO 126811 B1

1           Invenția se referă la un tranzistor cu efect de câmp de tip Siliciu pe strat izolator și  
la un procedeu de realizare a acestuia, ce face parte din categoria dispozitivelor  
3 micro-nano-electronice. Tranzistorul conform invenției este înrudit cu nanodispozitivele  
obținute prin miniaturizări succesive ale unei serii de tranzistoare Siliciu pe izolator cu forme  
5 speciale.

7           Invenția face parte din domeniul tehnic al electronicii, respectiv, al dispozitivelor  
micro-nano-electronice.

9           Alături de dispozitivele clasice bipolare sau metal-oxid-semiconductor integrate în  
tehnologia Siliciu pe izolator (SOI - Silicon On Insulator), s-au dezvoltat și dispozitive atipice,  
cum ar fi tranzistorul pseudo-MOS. Tranzistoarele cu efect de câmp, conform invenției, sunt  
11 de tip cavitate pe izolator, cu doi reprezentanți, și anume, nimic pe izolator (NOI - Nothing  
On Insulator) și aproape nimic pe izolator (a-NOI - almost-Nothing On Insulator), ce au o  
13 structură originală, derivată din clasa dispozitivelor SOI atipice. Mecanismele de conducție  
sunt însă cu totul altele la tranzistoarele cu cavitate, față de cele tip Siliciu pe izolator.

15           În afară de înrudirea cu dispozitivele Siliciu pe izolator, tranzistorul cu efect de câmp,  
conform invenției, este și un nanotranzistor. Alte nanodispozitive, precum tranzistorul cu un  
17 singur electron (SET - Single Electron Transistor), prezintă caracteristici statice cu maxime  
sau cu rezistență diferențială negativă (articol în Jurnalul IEEE Elec. Dev. Lett. 23, no.6,  
19 2002, pp. 366-368, cu autori: S. Mahapatra, A.M. Ionescu, K. Banerjee, A quasi-analytical  
SET model for few electron circuit simulation). Este de așteptat, ca și tranzistorul cu efect de  
21 câmp, conform invenției, fiind din start un dispozitiv cu o populație redusă de atomi, să  
prezinte curbe curent-tensiune diferite de cele clasice. Aportul de noutate maximă al  
23 tranzistoarelor cu cavitate pe izolator vine tocmai din forma particulară a caracteristicilor sale:  
caracteristici de ieșire cu minime la tranzistoarele a-NOI sau creșteri cu prag la tranzistoarele  
25 NOI - în niciun caz caracteristici cu clasică saturație a curentului. Caracteristicile de transfer  
prezintă maxime la tranzistoarele a-NOI și curbe descrescătoare la tranzistoarele NOI,  
27 complet diferite de curbele curent de drenă-tensiune pe poartă crescătoare cu prag, de la  
tranzistoarele clasice SOI-MOSFET, metal-oxid-semiconductor, realizate pe plachete SOI.

29           Apartenența la clasa tranzistoarelor cu efect de câmp pentru tranzistoarele cu  
cavitate pe izolator este justificată de două condiții, la care se supune atât structura a-NOI,  
31 cât și cea NOI: (1) prezintă caracteristici statice electrice neliniare; (2) tensiunea electrică  
aplicată pe poartă provoacă un câmp electric transversal ce modulează curentul  
33 sursă-drenă, ce se scurge pe direcție longitudinală, exercitând în acest mod efectul de câmp.  
Performanța tranzistoarelor conform invenției este indexată după valoarea transconductanței,  
35 adică a sensibilității cu care tranzistorul își modifică curentul de drenă, atunci când variază  
tensiunea pe poartă.

37           În scopul realizării tranzistorului a-NOI, se cunoaște o tehnologie de realizare a poli-  
siliciului undulat pe izolator, de grosimi de 3 până la 8 nm, elaborată de un grup de cerce-  
39 tători din Elveția (articol scris de D. Badila, S. Ecoffey, D. Bouvet, A. M. Ionescu, A study of  
fabrication technique for sub -jnm thin undulated polysilicon film, IEEE Int. Conf. Proc. Sinaia,  
41 România, 2003, pp. 95-98), care ar putea fi adaptată astfel încât să se obțină corodări ale  
văilor de polisiliciu până la 1-2 nm. Dezavantajul acestei metode tehnologice ar fi utilizarea  
43 exclusivă a corodării granulelor de polisiliciu, obținându-se tranzistoare pe polisiliciu.

45           Se mai cunoaște tranzistorul Siliciu pe nimic (SON - Silicon On Nothing), care a pornit  
tot de la tranzistorul SOI-MOSFET clasic, (Yang Choi, Dong Jang, brevet **US 2006/0208342**  
**A1**), dar a eliminat stratul de oxid, plasând canalul semiconductor pe un spațiu gol, evitând  
47 în acest mod interfețele cu oxizii, dar care nu are legătură cu principiul de funcționare al  
tranzistoarelor NOI din această invenție.

# RO 126811 B1

Problema tehnică pe care o rezolvă prezenta invenție constă în obținerea unei liniari- tăți bune a caracteristicilor de transfer, pe anumite domenii ale tensiunii de poartă și forme atipice a caracteristicilor de ieșire, în raport cu dispozitivele convenționale MOS sau bipolare.	1 3
Tranzistorul cu efect de câmp a-NOI, conform invenției, este alcătuit dintr-un substrat de siliciu, acoperit cu un strat din oxid de siliciu, peste care se află un strat inițial de siliciu de tip p, ce este ulterior configurat tehnologic, pe oxid sunt dispuse două insule n+, semicon- ductoare puternic dopate și înalte, legate între ele printr-un film semiconductor de tip p, cu grosimi sub 10 nm, ce permite deasupra sa existența unei cavități cu vacuum între insulele n+, iar insulele sunt legate la terminalul sursă și terminalul drenă, pe spatele structurii fiind plasat terminalul poartă.	5 7 9
Tranzistorul cu efect de câmp NOI, conform invenției, este alcătuit dintr-un substrat de siliciu, strat de oxid de siliciu, iar pe oxid sunt dispuse două insule n+ semiconductoare puternic dopate și înalte, despărțite de o cavitate cu vacuum - ce permite tunelarea între insulele n+, iar insulele sunt legate la terminalul sursă și terminalul drenă, pe spatele structurii fiind plasat terminalul poartă.	11 13 15
Procedeele de realizare a tranzistoarelor cu efect de câmp a-NOI și NOI, conform invenției, constă din următorii pași: pornire cu plachetă SOI, aplicare masca 1 pentru doparea puternică a insulelor n+, aplicare masca 2 pentru corodarea stratului central p în zona cavității, depunere contacte metalice de sursă, drenă și poartă în cadrul nivelului 3 de mascare, încapsulare finală.	17 19
Avantajele invenției:	21
- performanțe net superioare în comutație ale tranzistorului NOI, datorită vitezei supe- rioare de transport al purtătorilor prin vid față de transportul purtătorilor prin semiconductor;	23
- performanțele superioare în privința zgomotului, față de alte dispozitive semicon- ductoare;	25
- caracteristica de ieșire cu minimum a tranzistorului a-NOI, sau cu prag a tranzisto- rului NOI, forme de caracteristici neliniare rar întâlnite, ce conferă o arie de aplicații speciale;	27
- tranzistoarele cu cavitate pe izolator, de tip NOI sau a-NOI, nu necesită tehnologii costisitoare de generare a cavității vidate;	29
- obțin zgomot intern redus, întocmai ca la tuburile cu vid, dar cu avantajul dimen- siunilor nanometrice;	31
- consum de arie redus pe plachete;	
- acceptarea tehnologiei siliciului și a altor materiale semiconductoare;	33
- oferă un consum energetic extrem de redus (de exemplu: putere disipată de ordinul sute de pico-Wați).	35
În continuare, este prezentat un exemplu de realizare a tranzistoarelor cu efect de câmp a-NOI și NOI, precum și procedeele de realizare a tranzistoarelor cu cavitate pe izolator, conform invenției, în legătură cu fig. 1 ÷ fig. 8, în care:	37
- fig. 1 prezintă structura de ansamblu a unui tranzistor;	39
- fig. 2a prezintă o secțiune transversală prin tranzistorul a-NOI, pe care s-au evidențiat cele două căi de curent: $I_{MOS}$ și $I_{tunel}$ ;	41
- fig. 2b prezintă o secțiune transversală prin tranzistorul NOI, pe care s-a evidențiat calea de curent prin tunelare: $I_{tunel}$ ;	43
- fig. 3a, b, c, d, e prezintă principalii pași constructivi pentru realizarea tranzistoarelor NOI;	45
- fig. 4 prezintă caracteristicile statice de ieșire cu minime, simulate, la un tranzistor a-NOI pentru 2 grosimi ale filmului p;	47
- fig. 5a prezintă caracteristicile de ieșire, calculate analitic, ale unui tranzistor NOI, pentru 3 distanțe dintre insulele n+;	49

# RO 126811 B1

1 - fig. 5b prezintă caracteristicile de ieșire simulate ale aceluiași tranzistor NOI, pentru  
diverse tensiuni aplicate pe poartă;  
3 - fig. 6 prezintă caracteristici de transfer simulate ale tranzistoarelor a-NOI;  
- fig. 6a conține rezultatele pentru siliciu, iar fig. 6b, pentru diamant;  
5 - fig. 7 prezintă mai multe analize comparative ale caracteristicilor de transfer ale  
tranzistoarelor NOI;  
7 - fig. 7a compară caracteristicile, pentru 3 tipuri de dopări;  
- fig. 7b compară caracteristicile pentru 4 tipuri de materiale semiconductoare;  
9 - fig. 8 prezintă vectorii de curent simulați și contururi alb-negru ale densității de  
curent, cu probarea tunelării cavității: fig. 8a printr-un tranzistor a-NOI; fig. 8b printr-un  
11 tranzistor NOI.

## Exemplu de realizare pentru tranzistorul a-NOI și principiul de funcționare

13 Tranzistorul cu efect de câmp "aproape-nimic pe izolator", a-NOI, conform invenției,  
așa cum se observă în fig. 1 și fig. 2a, este alcătuit dintr-o plachetă cu un substrat de Siliciu  
15 **1**, peste care există un strat izolator **2**, de SiO<sub>2</sub>. Tranzistorul cu efect de câmp cu cavitare de  
tip a-NOI conține două insule n+, ca regiuni semiconductoare de sursă **3** și drena **4**, mult mai  
17 înalte decât filmul semiconductor de tip p - **9**, din regiunea canalului. Întregul material semi-  
conductor de pe izolator are formă de U. Cavitarea **5**, care se formează între insulele n+,  
19 devine corp de conducție principal al tranzistorului, atunci când grosimea filmului **9** scade  
sub câțiva nanometri. Terminalele metalice sunt: Sursa S - **6**, Drenă D - **7**, și terminalul de  
21 comandă al efectului de câmp, poarta G -**8**, ce se află pe spatele structurii - după cum se  
utilizează poarta din spate, Back Gate, la dispozitivele SOI. În fig. 1, dopările în insulele n+  
23 sunt N<sub>D</sub>, iar notațiile sunt: x<sub>n+</sub> lungimile insulelor n+, y<sub>n+</sub> înălțimile insulelor n+, z<sub>n+</sub> adâncimea  
insulelor n+, y<sub>p</sub> grosimea filmului p, y<sub>ox</sub> grosimea oxidului și d distanța dintre insulele n+. De  
25 asemenea, literele **S**, **D**, **G** indică terminalele Sursă, Drenă, respectiv, poartă, Gate.

27 Miniaturizarea tranzistoarelor a-NOI se face astfel: dimensiunile insulelor n+ **3** și **4**,  
ale sursei și drenei rămân fixe, iar grosimea filmului **p**, din spațiul porții **9**, se micșorează.  
29 Ultimul tranzistor din seria a-NOI are un singur strat atomic de siliciu peste izolator, gros de  
circa 0,3 nm. Următorul pas este eliminarea completă a filmului p de pe izolator, caz în care  
se obține configurația "Nimic pe Izolator" ca regiune activă a structurii, ce devine un  
31 tranzistor pur NOI.

Principiul de funcționare al tranzistorului a-NOI ține cont de existența a două căi de  
33 conducție electrică între Sursă **6** și Drenă **7**. Deoarece tranzistorul a-NOI păstrează și filmul  
semiconductor ultrasubțire de tip p - **9**, peste izolatorul **2**, o parte din curentul de drenă se  
35 scurge prin canalul de inversie format în acest film, sub forma componentei de curent de tip  
MOS, I<sub>MOS</sub>. Datorită formei în U a semiconductorului, mai există însă o cale de curent, prin  
37 cavitarea **5**, de deasupra filmului **p**. Unii purtători de sarcină electrică tunelează bariera de  
potențial semiconductor n+ / vid și ajung de la sursă la drenă, pe calea curentului I<sub>tunel</sub>.  
39 Superpoziția celor doi curenți dau curentul total de drenă prin tranzistorul a-NOI.

Fig. 2a prezintă o secțiune transversală prin tranzistorul a-NOI, pe care s-au  
41 evidențiat cele două căi de curent: I<sub>MOS</sub> și I<sub>tunel</sub>. Componenta de curent MOS circulă prin filmul  
p de jos, iar curentul tunel traversează cavitarea vidată de deasupra. Prin miniaturizarea  
43 filmului p, componenta de curent I<sub>MOS</sub> pierde din pondere în favoarea curentului I<sub>tunel</sub>. Curentul  
I<sub>MOS</sub> se supune formalismului curentului printr-un canal de inversie format într-o structură  
45 metal-oxid-semiconductor, dar cu forma particulară din cazul de față. Sediul fizic al acestui  
curent este filmul **p**, extrem de subțire, care se comportă ca film cu golire completă, din  
47 fenomenologia dispozitivelor SOI. Componenta I<sub>MOS</sub> >> I<sub>tunel</sub> la tranzistoarele a-NOI, iar ca  
dovadă în simulări, curentul de drenă este de ordinul 2nA, atunci când coexistă I<sub>MOS</sub> și I<sub>tunel</sub>,  
49 iar atunci când există numai componenta tunel, curentul de drenă este de ordinul 0,02 nA,  
după cum se vede în fig. 4 și fig. 5b.

## Exemplu de realizare pentru tranzistorul NOI și principiul de funcționare

Tranzistorul cu efect de câmp de tip "nimic pe izolator", NOI, conform invenției, așa cum se observă în fig. 1, când  $y_p = 0$ , și în secțiunea din fig. 2b, este alcătuit dintr-o plachetă cu un substrat de Siliciu **1**, peste care există un strat izolator **2** de SiO<sub>2</sub>. Tranzistorul cu cavitare de tip NOI conține două insule n+ ca regiuni semiconductoare de sursă **3** și drena **4**, suficient de înalte. Cavitarea **5**, care ocupă complet spațiul dintre insulele n+, devine corp de conducție principal al tranzistorului. Terminalele metalice sunt: Sursa **S - 6**, Drena **D - 7**, și terminalul de comandă al efectului de câmp, poarta **G - 8**, ce se află pe spatele structurii, ca la dispozitivele SOI. Structura tranzistorului NOI din fig. 2b, are drept arie activă cavitarea **5**, sau zona "Nimic", peste stratul de oxid **2**, SiO<sub>2</sub>. Substratul de siliciu **1** nu are rol funcțional electric, ci are doar rolul de a asigura rezistență mecanică structurii.

În cadrul tranzistorului cu efect de câmp NOI, insulele n+ **3** și **4** au rolul de a închide căile de conducție spre terminalele metalice de Sursă **S - 6** și Drenă **D - 7**, dar au și rolul de a asigura rezervorul de electroni, pentru curentul principal ce traversează vacuumul. Corpul tranzistorului sau zona activă de conducție nu mai este un corp solid, ci este cavitarea **5** cu vid sau vacuum, de deasupra izolatorului **2**, aflat între zidurile regiunilor n+ ale sursei și drenei.

Principiul de funcționare al tranzistorului NOI se explică cel mai clar, apelând la ruda sa apropiată din care a provenit - tranzistorul a-NOI. Tranzistorul NOI este un tranzistor a-NOI la limită, atunci când se suprimă calea fizică de conducție a filmului **p**, adică se face  $y_p = 0$  nm, în fig. 1. În consecință, la tranzistorul NOI întreg, curentul de drenă este un curent tunel,  $I_{tunel}$ . Dovada mecanismului de conducție prin tunelare la tranzistorul NOI este potrivirea foarte bună ca formă și ca gamă de valori, ale curentilor de drenă, calculați analitic din fig. 5a, cu cei simulați printr-un tranzistor NOI, din fig. 5b. Din punct de vedere analitic, pentru modelul curentului de drenă, se adoptă modelul Fowler-Nordheim al unui curent tunel printr-o barieră triunghiulară de potențial, ce corespunde barierei de potențial insule n+/vid:

$$I_D(V_{DS}) = \frac{A}{d^2 \sqrt{E_b}} \cdot V_{DS}^2 \cdot \exp\left(-\frac{B \cdot d \cdot E_b^{3/2}}{V_{DS}}\right) \quad (1)$$

unde:

- $I_D$  este curentul de drenă,
- $V_{DS}$  este tensiunea drenă-sursă, care antrenează curentul de drenă,
- $E_b$  este înălțimea barierei triunghiulare de potențial dinspre semiconductor către vid,
- $d$  este distanța dintre insulele n+,
- $A$  și  $B$  sunt constante de material.

Această funcție are derivata  $I$  pozitivă și în consecință are o variație crescătoare, din punct de vedere analitic. Simulările în Atlas ale structurii NOI confirmă aceeași dependență. Pentru ca probabilitatea de tunelare să fie apreciabilă, trebuie ca distanța dintre insulele n+, notată cu  $d$ , să fie sub 4 nm.

Fig. 8a prezintă vectorii de curent simulați și contururi ale densității de curent printr-un tranzistor a-NOI cu  $y_p = 1$  nm, iar fig. 8b, printr-un tranzistor NOI. Vectorii de curent prin vacuum, linii punctate în ambele figuri, dovedesc manifestarea curentului tunel  $I_{tunel}$ , între sursă și drenă, pentru  $V_S = 0V$ ,  $V_D = 6V$ ,  $V_G = 2V$  atât la tranzistorul NOI, cât și la tranzistorul a-NOI. La tranzistorul a-NOI, se observă aglomerarea liniilor de curent prin filmul **p**, ce determină componenta  $I_{MOS}$ .

# RO 126811 B1

1 Cele două tipuri de tranzistoare a-NOI și NOI sunt interdependente, puternic  
inter-relaționate, se implică unul pe altul, au mecanisme de conducție înrudite. Se poate scrie  
3 că NOI este limita (a-NOI), când grosimea filmului  $p$ , notată cu  $y_p$  (ca în fig. 1), tinde la zero:  
$$\text{NOI} = \lim_{y_p \rightarrow 0} (\text{a-NOI}).$$

5 Procedul de realizare a tranzistoarelor cu efect de câmp a-NOI și NOI, conform  
invenției, include următorii pași tehnologici:

7 - se pornește de la o plachetă SOI Siliciu pe izolator cu un strat inițial monocristalin  
10, din siliciu de tip  $p$ , gros de  $10 \div 50$  nm, lung de  $50 \div 100$  nm, peste un oxid gros de  $50$   
9  $\div 100$  nm. Fig. 3a prezintă placheta SOI de start. Dacă grosimea inițială a stratului  $p$   
depășește 100 nm, se aplică tehnici de subțiere. De asemenea, se poate ajusta doparea  
11 filmului  $p$ , prin impurificări adiționale. Fig. 3a este singura figură în care s-a notat explicit  
stratul inițial de siliciu  $p$ , ca reperul 10. Acesta este un reper intermediar, care se va  
13 transforma în alte repere, pe măsura procesării tehnologice;

- se definesc în cadrul primului proces de mascare insulele  $n+$ , de Sursă și Drenă,  
15 dopate controlat cu impurități donoare, Fosfor. Distanța dintre ele trebuie să fie de maximum  
 $4 \div 5$  nm. Insulele  $n+$  se dopează la nivelul  $10^{19} \div 10^{21}$   $\text{cm}^{-3}$ . Fig. 3b prezintă aplicarea Măștii  
17 1 pentru doparea puternică a stratului inițial de Siliciu 10 al plachetei SOI, doar în zonele de  
sursă și drenă, ce vor deveni insulele  $n+$  - 3 și 4;

19 - urmează procesul de mascare doi: corodarea stratului de siliciului  $p$ , 10, rămas în  
zona centrală a filmului SOI. Este o corodare în adâncime, de mare precizie, astfel încât să  
21 se poată lăsa un film  $p$  extrem de subțire - 9 - sub 2 nm, peste oxid, în cazul tranzistoarelor  
a-NOI. În cazul tranzistoarelor NOI, corodarea siliciului  $p$  se face până la eliminarea  
23 completă a acestuia. Fig. 3c prezintă Masca 2 ce acoperă insulele  $n+$  și permite corodarea  
zonei  $p$  cu definirea cavității 5. Dacă, după corodare, sunt lăsate câteva straturi atomice din  
25 filmul  $p$ , rezultă structura a-NOI. Dacă timpul de corodare este încă puțin crescut, astfel încât  
se atinge oxidul, se obține structura NOI;

27 - se depun contactele metalice, la nivelul de mascare 3: pe regiunile  $n+$  pentru  
terminalele Sursă și Drenă, și pe spatele plachetei pentru terminalul poartă Gate. Fig. 3d  
29 prezintă structura finală, după eliminarea fotorezistului de mascare, cu metalizările de Sursă,  
Drenă și Poartă, pentru tranzistorul aproape NOI, a-NOI. Fig. 3e prezintă structura finală cu  
31 metalizările de Sursă, Drenă și Poartă, pentru tranzistorul NOI;

- urmează etapele standard finale de decupare de pe plachetă, etanșare și  
33 încapsulare.

Tranzistoarele cu efect de câmp NOI și a-NOI nu necesită tehnologii costisitoare de  
35 obținere a cavității vidate, deoarece numărul de molecule de aer, în condiții atmosferice  
obișnuite, presiune 1 atm, temperatura 300 K, aflate într-un volum de circa  $100$   $\text{nm}^3$  pentru  
37 regiunea "Nimic" - cavitatarea 5, este de 2 molecule. Astfel, ciocnirile purtătorilor mobili de  
sarcină cu aerul sunt neglijabile, iar ciocnirile cu atomii vreunei rețele cristaline nu există în  
39 cavitate. De aici, performanțele deosebite în zgomot, întocmai ca la tuburile cu vid. Fig. 3a  
 $\div$  e prezintă etapele tehnologice de realizare a produsului și structurile NOI finale.

41 Testarea tranzistoarelor cu cavitate pe izolator, conform invenției, include simularea  
în programul Atlas, pe stație SUN a caracteristicilor statice neliniare, ca dovadă a efectului  
43 de tranzistor pentru structura NOI propusă.

- Modelele adoptate în ATLAS, pentru definirea cât mai fidelă a unei structuri reale  
45 NOI, au fost: modelul SRH pentru rata netă de recombinare, dependența mobilităților de  
câmpurile laterale prin intermediul funcției "fldmob", modificarea mobilităților purtătorilor în  
47 vecinătatea suprafețelor prin funcția "surfmob", tunelarea "Bandă-Bandă" și cea "Fowler

# RO 126811 B1

Nordheim" prin funcțiile "bbt.std" și "fnord", distribuția Fermi-Dirac pentru electronii din insulele semiconductoare puternic dopate, "mesh" la distanțe uniatomice pe axele Ox, Oy, pentru interpretarea nodurilor ca atomi, sarcina de la interfața cu oxidul de  $5 \times 10^{10} \text{ e/cm}^2$ , diferența de potențial metal-semiconductor ca în librăria Atlas, pentru metalele de Sursă, Drenă, Poartă, corecții cuantice de modulare a benzii interzise în vecinătatea suprafeței prin activarea opțiunii B.Dort.

- Pentru testarea caracteristicilor de ieșire, s-au aplicat următoarele tensiuni electrice pe cele 3 terminale, la întreaga serie de tranzistoare tip cavitate pe izolator: tensiunea pe Sursa **S** a fost  $V_S = 0 \text{ V}$ , tensiunea pe Drenă **D** a fost ridicată de la  $V_D = 0 \text{ V}$  la  $V_D = 4 \text{ V}$  și uneori până la  $V_D = 8 \text{ V}$ , menținând constantă tensiunea aplicată pe poartă **G**,  $V_G$ . Caracteristicile simulate  $I_D - V_{DS}$  prezintă forme cu minime, deci cu zerouri ale derivatei I pentru tranzistorul a-NOI, și cu creșteri cu prag, deci cu zerouri ale derivatei a III-a pentru tranzistorul NOI. Lipsa saturației caracteristicilor la tensiunile maxime aplicate pe drenă dovedesc absența fenomenului de "pinch-off", adică scurtarea canalului pentru tranzistoarele a-NOI sau NOI. Fig. 4 prezintă caracteristicile statice de ieșire cu minime, simulate, la un tranzistor a-NOI pentru 2 grosimi ale filmului p, când tensiunea pe poartă a fost menținută la +3 V. În aceste simulări, parametrii constructivi ai tranzistorului au fost  $x_{n+} = 3 \text{ nm}$ ,  $y_{n+} = 7 \text{ nm}$ ,  $N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,  $d = 3 \text{ nm}$ ,  $y_{ox} = 10 \text{ nm}$ ,  $y_p = 1 \text{ nm}$ . Fig. 5a prezintă caracteristici de ieșire calculate analitic cu modelul unui tranzistor NOI pentru 3 distanțe dintre insulele n+. Alăturat, în fig. 5b, sunt prezentate caracteristici de ieșire simulate ale aceluiași tranzistor NOI, pentru diverse tensiuni  $V_G$ , aplicate pe poartă. Parametrii constructivi ai tranzistorului au fost:  $x_{n+} = 3 \text{ nm}$ ,  $y_{n+} = 7 \text{ nm}$ ,  $N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,  $y_{ox} = 10 \text{ nm}$ ,  $y_p = 0 \text{ nm}$ , și distanța  $d = 3 \text{ nm}$ , în cazul 5b.

- Pentru investigarea caracteristicilor de transfer, s-au aplicat următoarele tensiuni electrice pe cele 3 terminale, la întreaga serie de tranzistoare NOI: tensiunea pe Sursa **S** a fost  $V_S = 0 \text{ V}$ , tensiunea pe poarta **G** a fost ridicată de la  $V_G = 0 \text{ V}$  la  $V_G = 8 \text{ V}$ , menținând tensiuni constante aplicate pe drenă,  $V_{D1} = 0,3 \text{ V}$ ,  $V_{D2} = 3 \text{ V}$ ,  $V_{D3} = 10 \text{ V}$ . Caracteristicile simulate  $I_D - V_{GS}$  prezintă forme cu maxime urmate de o saturație a caracteristicilor, adică cu zerouri ale derivatei I și II pentru tranzistorul a-NOI, și forme descrescătoare pentru tranzistorul NOI. Caracteristicile  $I_D - V_{GS}$  descrescătoare ale tranzistorului NOI sunt atipice, față de comportamentul crescător al elementelor rezistive de circuit sau de comportamentul neliniar crescător cu prag,  $I_D - V_{GS}$ , al tranzistoarelor SOI-MOSFET clasice.

Fig. 6 prezintă caracteristici de transfer simulate ale tranzistoarelor a-NOI, pentru diverse grosimi ale filmului p, pentru  $V_{DS} = +1 \text{ V}$ , când tensiunea pe poarta Gate a fost ridicată de la 0 la +3 V.

Fig. 6a conține rezultatele pentru siliciu, iar fig. 6b, pentru diamant, ca materiale semiconductoare peste oxid. Pentru ambele materiale, caracteristicile acestor nanodispozitive prezintă maxime doar pentru grosimi ale filmului p sub 10 nm. Curbele  $I_D - V_{GS}$  devin crescătoare cu prag, ca la tranzistoarele SOI-MOSFET obișnuite, dacă grosimea filmului p depășește 10 nm, la ambele materiale.

Fig. 7 prezintă mai multe analize comparative ale caracteristicilor de transfer ale tranzistoarelor NOI fără film p. Fig. 7a compară caracteristicile, pentru 3 tipuri de dopări  $N_D$ :  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  uniform,  $7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  uniform și  $7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  gaussian. Se dovedește că sensibilitatea maximă în transconductanță o oferă doparea maximă uniformă. Fig. 7b prezintă o analiză comparativă între caracteristici, pentru 4 tipuri de materiale semiconductoare din care se pot construi insulele n+, toate cu aceleași dopări și geometrii. Se dovedește că sensibilitatea maximă în transconductanță o oferă diamantul, și cea mai mică germaniul. Acest fapt este explicabil, ținând cont de lățimea benzii interzise cu valori minime pentru Ge și maxime pentru diamant. Forma curbelor curent-tensiune simulate este probată și, în acest caz, de teoria Fowler-Nordheim.

# RO 126811 B1

1 Tranzistoarele cu efect de câmp cu cavitate pe izolator pot fi aplicate în realizarea  
circuitelor electronice, cu funcții neliniare cunoscute sau cu funcții noi. Datorită caracteristi-  
3 cilor de ieșire cu prag, tranzistoarele NOI pot fi utilizate la implementarea circuitelor integrate  
digitale. Liniaritatea bună a caracteristicilor de transfer, pe anumite domenii ale tensiunii de  
5 poartă, le recomandă ca excelente dispozitive traductoare în nano-senzori, unde liniaritatea  
funcției traductoare este prima cerință. În stadiul actual, nu sunt utile în amplificare, deoarece  
7 nu se manifestă absolut deloc saturația caracteristicilor. Dar, tranzistoarele a-NOI pot fi apli-  
cate în realizarea oscilatoarelor miniaturizate, comparatoare integrate la nivel de dispozitiv,  
9 detectoare de nivel sau alte funcții noi. De asemenea, tranzistoarele conform invenției pot  
fi fabricate prin procedeul prezentat mai sus, dar și prin metodele tehnologiei semicon-  
11 ductoare actuale, fără tehnici adiționale scumpe, pentru vidarea nano-cavității, conform  
fluxului tehnologic prezentat în această propunere de brevet.



# RO 126811 B1

## Revendicări

1. Tranzistor cu efect de câmp, alcătuit din substrat (1) din siliciu, acoperit cu un strat (2) de oxid de siliciu, peste care se află cu un strat (10) de siliciu de tip p, **caracterizat prin aceea că**, pe stratul (2) de oxid de siliciu, sunt dispuse două insule (3 și 4) semiconductoare puternic dopate n+ și înalte, legate între ele printr-un film (9) semiconductor de tip p, cu grosimi sub 10 nm, ce permite deasupra sa existența unei cavități (5) cu vacuum, ce ocupă întreg spațiul dintre insulele n+, iar insulele n+ (3 și 4) sunt legate la terminalul sursă (6) și terminalul drenă (7), pe spatele structurii (1), fiind plasat terminalul poartă (8). 3 5 7 9
2. Tranzistor conform revendicării 1, **caracterizat prin aceea că** prezintă caracteristici de ieșire  $I_D - V_{DS}$  cu minime și caracteristici de transfer  $I_D - V_{GS}$  cu maxime. 11
3. Tranzistor conform revendicării 1, **caracterizat prin aceea că**, pe stratul (2) de oxid de siliciu, sunt dispuse cele două insule (3 și 4) semiconductoare puternic dopate n+ și înalte, despărțite de o cavitate (5) cu vacuum, ce permite tunelarea între insulele n+, iar insulele n+ (3 și 4) sunt legate la terminalul sursă (6) și terminalul drenă (7), pe spatele structurii (1) fiind plasat terminalul poartă (8). 13 15
4. Tranzistor conform revendicării 3, **caracterizat prin aceea că** prezintă caracteristici de ieșire  $I_D - V_{DS}$  crescătoare cu prag și caracteristici de transfer  $I_D - V_{GS}$  descrescătoare, neconvenționale. 17 19
5. Tranzistoare cu efect de câmp, conform revendicărilor 1 și 3, **caracterizate prin aceea că** materialul semiconductor utilizat în construcția acestora poate fi siliciul, diamantul sau alt semiconductor, testările pe diferite materiale validând aceleași forme particulare pentru caracteristicile statice ale tranzistoarelor de tip cavitate pe izolator. 21 23
6. Procedeu de realizare a tranzistoarelor, conform revendicărilor 1 și 3, **caracterizat prin aceea că** acesta constă din următorii pași: 25
- se pornește de la o plachetă tip SOI - Siliciu (1) pe izolator (2) cu un strat inițial monocristalin (10), din siliciu de tip p, gros de  $50 \div 100$  nm, lung de  $50 \div 100$  nm, peste un oxid gros de  $50 \div 100$  nm, unde grosimea inițială a stratului p depășește uzual 10 nm; 27
  - se aplică tehnici de subțiere a filmului (10) până la zeci de nanometri și se ajustează doparea filmului p, prin impurificări adiționale; 29
  - se definesc, în cadrul primului proces de mascare, insulele n+, de Sursă și Drenă, dopate controlat cu impurități donoare, Fosfor, distanța dintre acestea fiind în jur de  $1 \div 5$  nm, insulele dopându-se la nivelul  $10^{19} \div 10^{21}$  cm<sup>-3</sup>, doar în zonele de sursă și drenă, ce vor deveni insulele n+ (3 și 4); 31 33
  - urmează procesul de mascare doi, respectiv, corodarea stratului de siliciului p, (10) rămas în zona centrală a filmului SOI, o corodare în adâncime, de mare precizie, astfel încât să se poată lăsa un film p extrem de subțire - (9) - sub 2 nm, peste oxid, în cazul tranzistoarelor a-NOI, și 0 nm, în cazul tranzistoarelor NOI, și o cavitate (5) între insulele n+ atât la a-NOI, cât și la NOI; 35 37 39
  - se depun contactele metalice, la nivelul de mascare 3: pe regiunile n+ pentru terminalele Sursă (6) și Drenă (7), și pe spatele plachetei pentru terminalul poartă (8) Gate, după care urmează etapele standard finale, de decupare de pe plachetă, etanșare și încapsulare. 41 43

(51) Int.Cl.

H01L 29/786 (2006.01),

H01L 29/772 (2006.01),

H01L 21/335 (2006.01),

H01L 21/8232 (2006.01),

H01L 27/085 (2006.01)

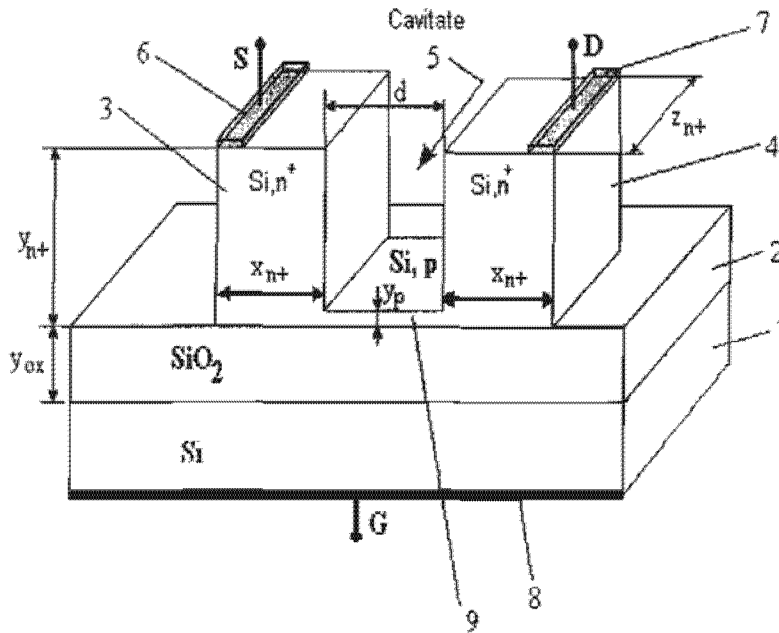


Fig. 1

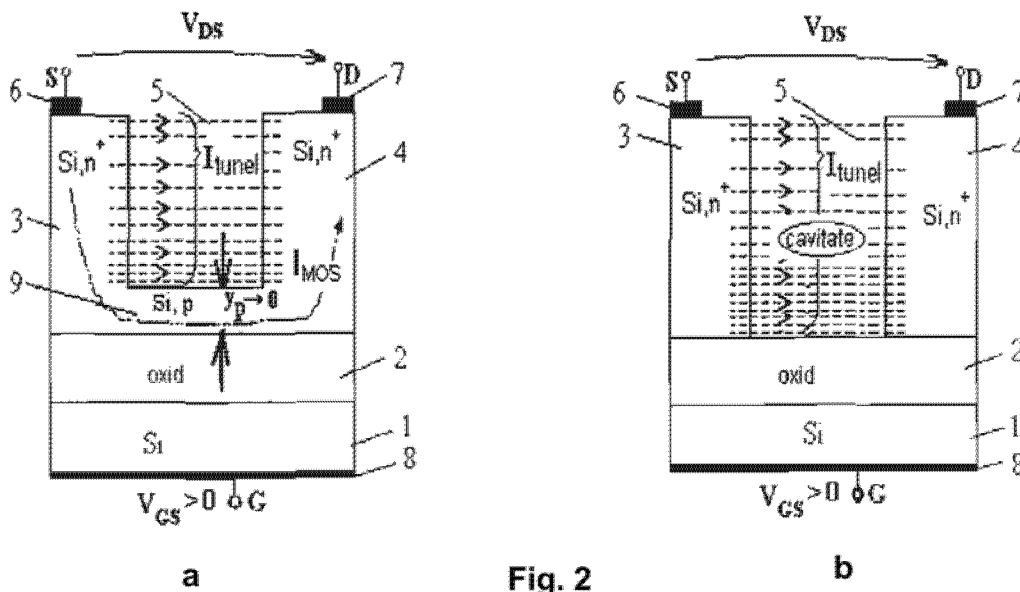


Fig. 2

(51) Int.Cl.

H01L 29/786 (2006.01);

H01L 29/772 (2006.01);

H01L 21/335 (2006.01);

H01L 21/8232 (2006.01);

H01L 27/085 (2006.01)

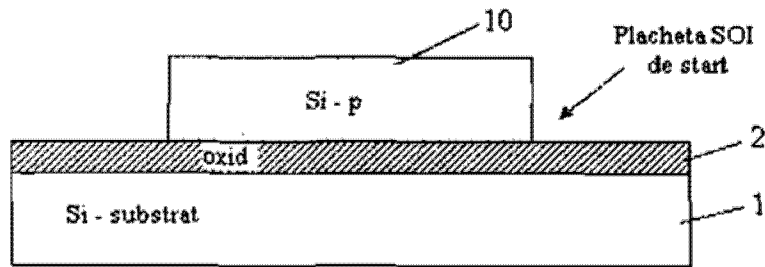


Fig. 3a

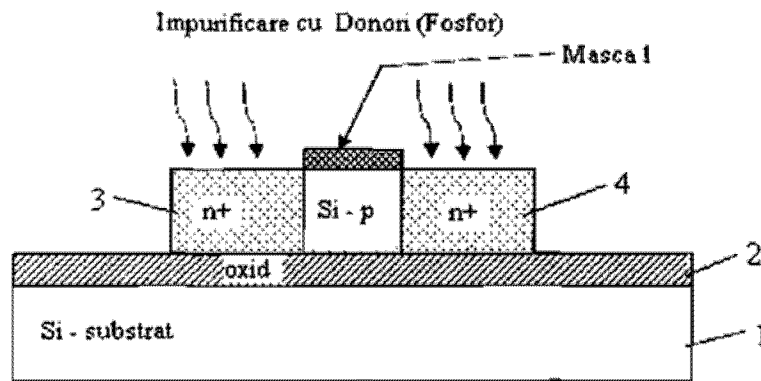


Fig. 3b

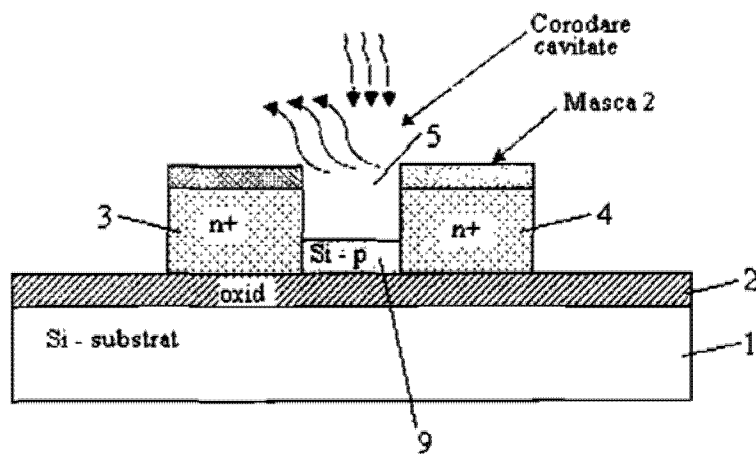


Fig. 3c

(51) Int.Cl.

H01L 29/786 (2006.01),

H01L 29/772 (2006.01),

H01L 21/335 (2006.01),

H01L 21/8232 (2006.01),

H01L 27/085 (2006.01)

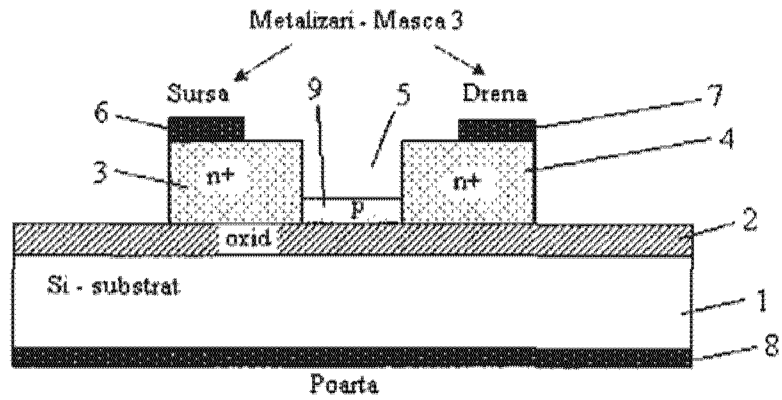


Fig. 3d

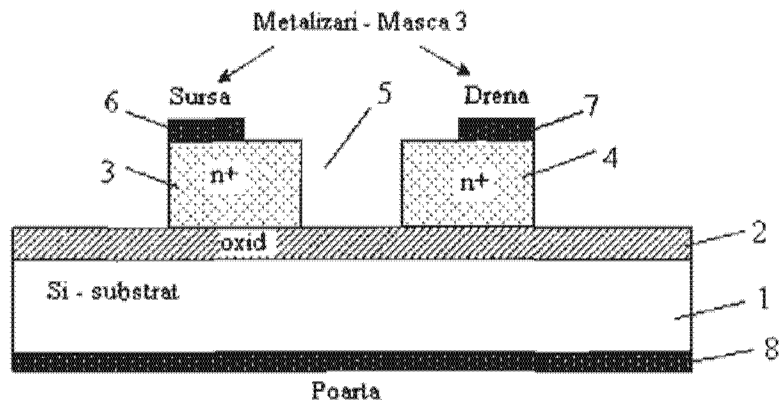


Fig. 3e

(51) Int.Cl.

H01L 29/786 (2006.01);

H01L 29/772 (2006.01);

H01L 21/335 (2006.01);

H01L 21/8232 (2006.01);

H01L 27/085 (2006.01)

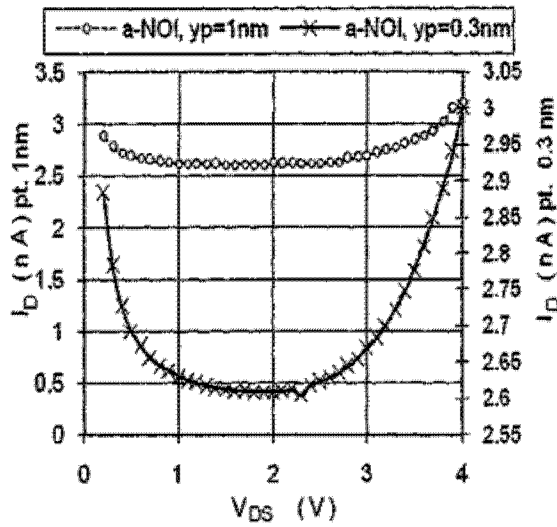
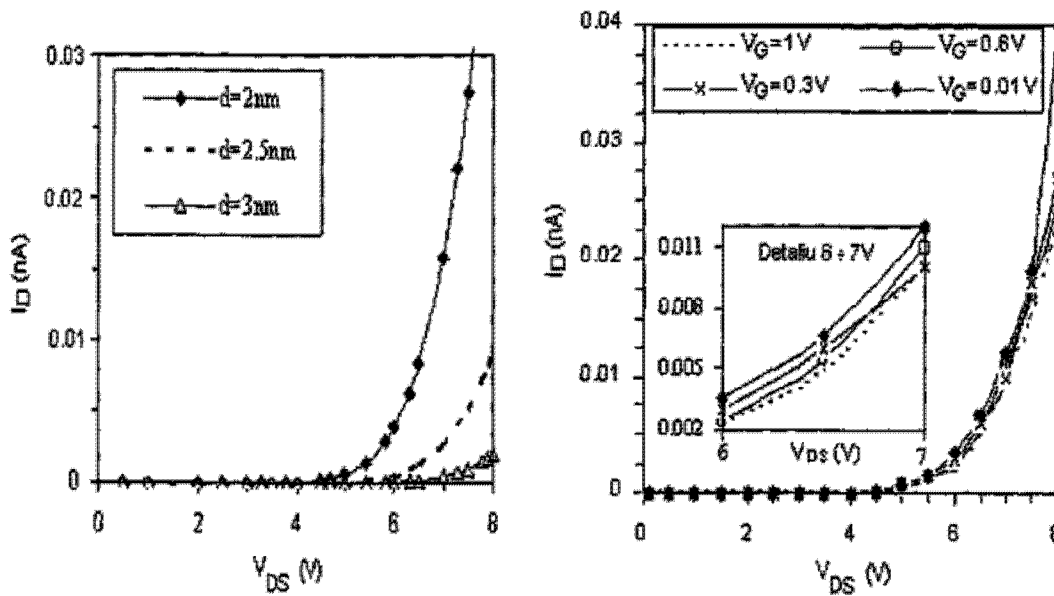


Fig. 4



a

Fig. 5

b

(51) Int.Cl.

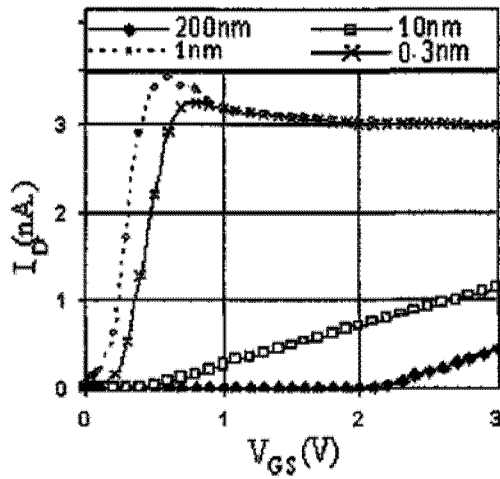
H01L 29/786 (2006.01),

H01L 29/772 (2006.01),

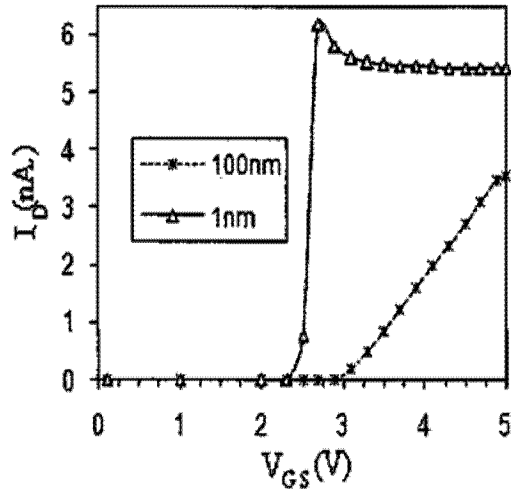
H01L 21/335 (2006.01),

H01L 21/8232 (2006.01),

H01L 27/085 (2006.01)

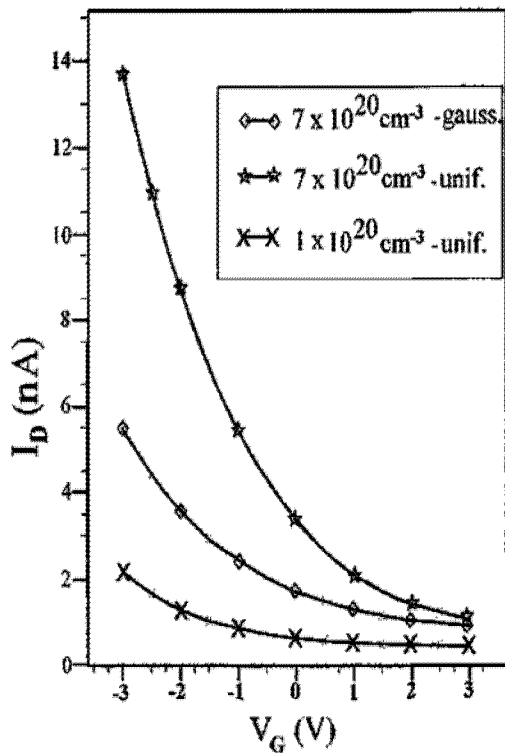


a

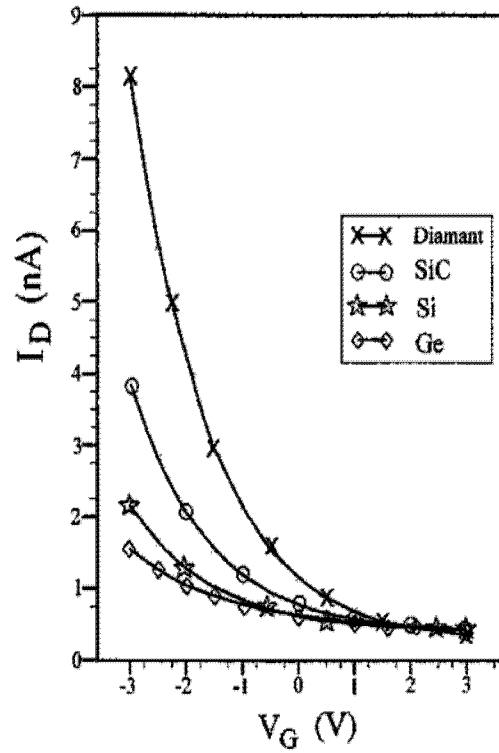


b

Fig. 6



a



b

Fig. 7

(51) Int.Cl.

H01L 29/786 (2006.01);

H01L 29/772 (2006.01);

H01L 21/335 (2006.01);

H01L 21/8232 (2006.01);

H01L 27/085 (2006.01)

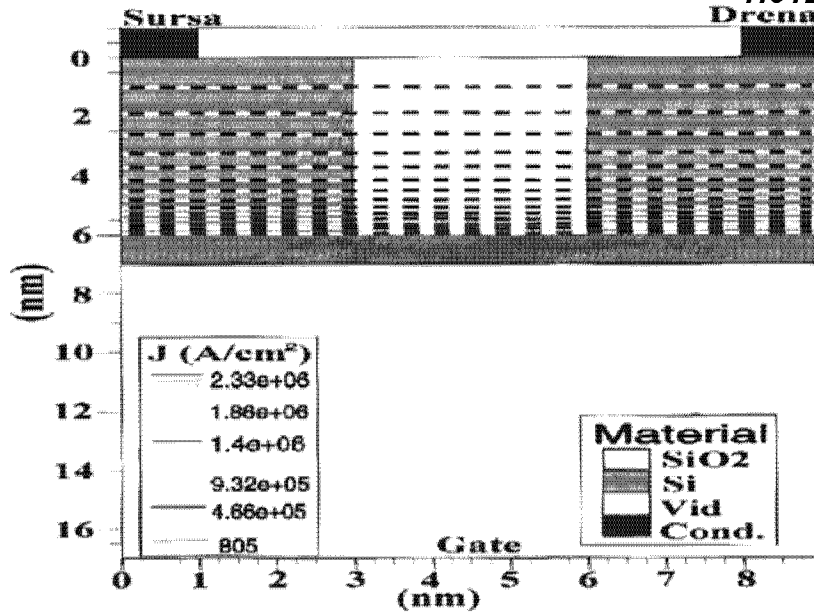


Fig. 8a

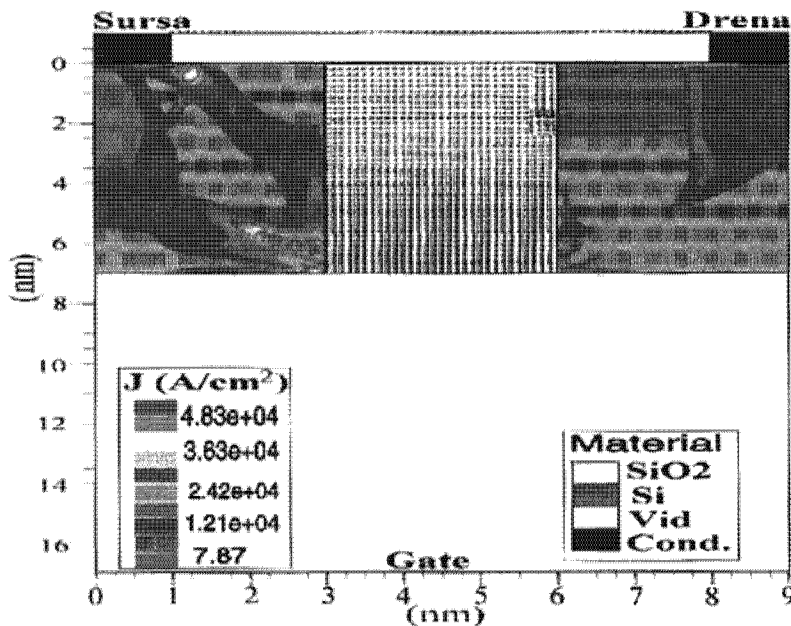


Fig. 8b



Editare și tehnoredactare computerizată - OSIM  
 Tipărit la: Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci  
 sub comanda nr. 779/2013