



(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2010 01130

(22) Data de depozit: 18.11.2010

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

(71) Solicitant:
• UNIVERSITATEA POLITEHNICĂ
BUCUREȘTI, SPLAIUL INDEPENDENȚEI
NR.313, SECTOR 6, BUCUREȘTI, B, RO

(72) Inventatori:
• RAVARIU CRISTIAN,
STR. IZVORUL CRIȘULUI NR.15, BL.A8,
SC.F, AP.83, SECTOR 4, BUCUREȘTI, B,
RO

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

(57) Rezumat:

Invenția se referă la un tranzistor cu efect de câmp, de tip cavitate pe izolator, și un procedeu de realizare a tranzistorului. Tranzistorul conform invenției este alcătuit dintr-un substrat (1) din siliciu, acoperit cu un strat (2) de oxid de siliciu pe care se află un strat (10) de siliciu de tip p, pe stratul (2) de oxid de siliciu fiind dispuse două insule (3, 4) semiconductoare, puternic dopate n^+ și înalte, legate între ele printr-un film (9) semiconductor de tip p, cu grosimi sub 4 nm ce permite deasupra sa existența unei cavități (5) cu vacuum ce ocupă întreg spațiul dintre insule (3, 4) n^+ , care sunt legate la un terminal sursă (6) și un terminal drenă (7), pe spatele structurii (1) fiind plasat un terminal poartă (8). Procedeu on-form invenției constă în următoarele faze: se alege o plachetă tip SOI, siliciu pe izolator, cu un strat inițial monocristalin, se aplică tehnici de subțiere a stratului, după care se definesc, în cadrul unui prim proces de mascare, niște insule n^+ , de sursă și drenă, dopate controlat cu impurități donoare, apoi urmează un al doilea proces de mascare, respectiv, corodarea stratului de siliciu p, după care se depun contactele metalice, la nivelul al treilea de mascare, pe

regiunile n^+ , pentru terminalele sursă și drenă, și pe spatele plachetei, pentru terminalul poartă, etapa finală fiind de decupare de pe plachetă, etanșare și încălzire.

Revendicări: 6
Figuri: 8

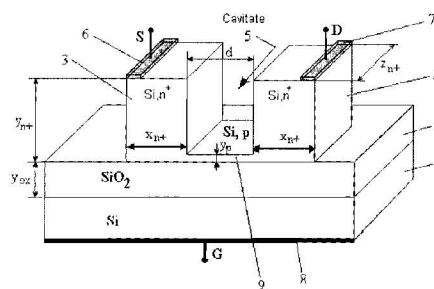


Fig. 1



Tranzistor cu efect de câmp de tip cavitate pe izolator și procedeul de realizare al acestuia

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

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

Alături de dispozitive 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 de tip cavitate pe izolator sau nimic pe izolator (NOI - Nothing On Insulator) și aproape nimic pe izolator (a-NOI - almost-Nothing On Insulator), ce au o 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.

În afară de înrudirea cu dispozitivele Siliciu pe izolator, tranzistorul cu efect de câmp conform invenției *este și un nanotranzistor*. Alte nano-dispozitive, precum tranzistorul cu un 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, 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 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 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 NOI - în nici un caz caracteristici cu clasică saturație a curentului. Caracteristicile de transfer prezintă maxime la tranzistoarele a-NOI și curbe descrescătoare la tranzistoarele NOI, 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.

1
Rana

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 cât și cea NOI: (1) prezintă caracteristici statice electrice ne-liniare; (2) tensiunea electrică aplicată pe poartă provoacă un câmp electric transversal ce modulează curentul sursă-drenă, ce se scurge pe direcție longitudinală, exercitând în acest mod *efectul de câmp*. Performanța tranzistoarelor conform invenției este indexată după valoarea transconductanței, adică a sensibilității cu care tranzistorul își modifică curentul de drenă, atunci când variază tensiunea pe poartă.

Problema tehnică pe care o rezolvă prezenta invenție constă în obținerea unei liniarități 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.

În scopul realizării tranzistorului a-NOI se cunoaște o tehnologie de realizare a polisiliciului undulat pe izolator, de grosimi 3nm până la 8nm elaborată de un grup de cercetători din Elveția (articol scris de D.Badila, S.Ecoffey, D.Bouvet, A.M. Ionescu, *A study of fabrication technique for sub – 10nm thin undulated polysilicon film*, IEEE Int. Conf. Proc, Sinaia, Romania, 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 exclusivă a corodării granulelor de polisiliciu, obținându-se tranzistoare pe polisiliciu.

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 - Patent US 2006/0208342 A1), dar a eliminat stratul de oxid, plasând canalul semiconductor pe un spațiu gol, evitând în acest mod interfețele cu oxizii, dar care nu are legătură cu principiul de funcționare al tranzistoarelor NOI din această invenție.

Tranzistorul cu efect de câmp a-NOI, conform invenției, este alcătuit din 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+, semiconductoare puternic dopate și înalte, legate între ele printr-un film semiconductor de tip p cu grosimi sub 4nm, 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.

Tranzistorul cu efect de câmp NOI, conform invenției este alcătuit din 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.

Procedeul 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.

Avantajele invenției:

- performanțele net superioare în comutație ale tranzistorului NOI datorită vitezei superioare de transport a purtătorilor prin vid față de transportul purtătorilor prin semiconductor;
- performanțele superioare în privința zgomotului, față de alte dispozitive semiconductoare;
- caracteristica de ieșire cu minim a tranzistorului a-NOI, sau cu prag a tranzistorului NOI, forme de caracteristici neliniare rar întâlnite, ce conferă o arie de aplicații speciale;
- tranzistoarele cu cavitare pe izolator, de tip NOI sau a-NOI, nu necesită tehnologii costisitoare de ținere a cavității vidate;
- obțin zgomot intern redus, întocmai ca la tuburile cu vid, dar cu avantajul dimensiunilor nanometrice;
- consum de arie redus pe plachete;
- acceptarea tehnologiei siliciului și a altor materiale semiconductoare;
- oferă un consum energetic extrem de redus (ex. putere disipată de ordinul sute de pico-Wați).

În continuare, este prezentat un exemplu de realizare a tranzistoarelor cu efect de câmp a-NOI și NOI precum și procedeul de realizare a tranzistoarelor cu cavitare pe izolator, conform invenției, în legătură cu fig.1 ÷ fig.8, în care:

Fig. 1 prezintă structura de ansamblu a unui tranzistor.

Fig. 2.a. prezintă o secțiune transversală prin tranzistorul a-NOI, pe care s-au evidențiat cele două căi de curent: I_{MOS} și I_{tunel} .

Fig. 2.b. prezintă o secțiune transversală prin tranzistorul NOI, pe care s-a evidențiat calea de curent prin tunelare: I_{tunel} .

Fig. 3 a,b,c,d,e prezintă principalii pași constructivi pentru realizarea tranzistoarelor NOI.

Fig. 4. prezintă caracteristicile statice de ieșire cu minime, simulate, la un tranzistor a-NOI pentru 2 grosimi ale filmului p.

Fig. 5.a. prezintă caracteristicile de ieșire calculate analitic ale unui tranzistor NOI pentru 3 distanțe dintre insulele n+.

Fig. 5.b prezintă caracteristicile de ieșire simulate ale aceluiași tranzistor NOI, pentru diverse tensiuni aplicate pe poartă.

Fig. 6 prezintă caracteristici de transfer simulate ale tranzistoarelor a-NOI: fig. 6.a conține rezultatele pentru siliciu, iar fig. 6.b pentru diamant.

Fig. 7 prezintă mai multe analize comparative ale caracteristicilor de transfer ale tranzistoarelor NOI: fig. 7.a. compară caracteristicile, pentru 3 tipuri de dopări; fig. 7.b. compară caracteristicile pentru 4 tipuri de materiale semiconductoare.

Fig. 8 prezintă vectorii de curent simulați și contururi colorate ale densității de curent, cu probarea tunelării cavității: fig. 8.a. printr-un tranzistor a-NOI; fig. 8.b. printr-un tranzistor NOI.

Exemplu de realizare

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

Tranzistorul cu efect de câmp "aproape-nimic pe izolator", a-NOI, conform invenției, așa cum se observă în fig. 1 și fig. 2.a, este alcătuit dintr-o plachetă cu un substrat de Siliciu **1**, peste care există un strat izolator **2** de SiO₂. Tranzistorul cu efect de câmp cu cavitate de tip a-NOI conține două insule n+ ca regiuni semiconductoare de sursă **3** și drenă **4**, mult mai înalte decât filmul semiconductor de tip p - **9**, din regiunea canalului. Întregul material semiconductor de pe izolator are formă de "U". Cavitatea **5**, care se formează între insulele n+, devine corp de conducție principal al tranzistorului, atunci când grosimea filmului **9** scade sub câțiva nanometri. 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 - după cum se utilizează poarta din spate (Back Gate) la dispozitivele SOI. În fig. 1 dopările în insulele n+ sunt N_D, iar notațiile sunt: x_{n+} lungimile insulelor n+, y_{n+} înălțimile insulelor n+, z_{n+} adâncimea insulelor n+, y_p grosimea filmului p, y_{ox} grosimea oxidului și d distanța dintre insulele n+. De asemenea, literele **S**, **D**, **G** indică terminalele Sursă, Drenă, respectiv poarta (Gate).

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. Ultimul tranzistor din seria a-NOI, are un singur strat atomic de siliciu peste izolator, gros de cca 0.3nm. 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 tranzistor pur NOI.

Principiul de funcționare al tranzistorului a-NOI ține cont de existența a două căi de conducție electrică între Sursă **6** și Drenă **7**. Deoarece tranzistorul a-NOI păstrează și filmul semiconductor

ultra-subțire de tip p - **9**, peste izolator **2**, o parte din curentul de drenă se scurge prin canalul de inversie format în acest film, sub forma componentei de curent de tip MOS, I_{MOS} . Datorită formei în "U" a semiconductorului, mai există însă o cale de curent, prin cavitatea - **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_{tunel} . Superpoziția celor doi curenți dau curentul total de drenă prin tranzistorul a-NOI.

Fig. 2.a. prezintă o secțiune transversală prin tranzistorul a-NOI, pe care s-au evidențiat cele două căi de curent: I_{MOS} și I_{tunel} . Componenta de curent MOS circulă prin filmul p de jos, iar curentul tunel traversează cavitatea vidată de deasupra. Prin miniaturizarea filmului p, componenta de curent I_{MOS} pierde din pondere în favoarea curentului I_{tunel} . Curentul I_{MOS} se supune formalismului curentului printr-un canal de inversie format într-o structură 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 fenomenologia dispozitivelor SOI. Componenta $I_{MOS} \gg I_{tunel}$ la tranzistoarele a-NOI, iar ca dovadă în simulări, curentul de drenă este de ordinul 2nA atunci când co-există I_{MOS} și I_{tunel} , iar atunci când există numai componenta tunel, curentul de drenă este de ordinul 0.02nA, după cum se vede în fig. 4 și fig. 5.b.

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. 2.b, este alcătuit dintr-o plachetă cu un substrat de Siliciu **1**, peste care există un strat izolator **2** de SiO₂. Tranzistorul cu cavitate de tip NOI conține două insule n+ ca regiuni semiconductoare de sursă **3** și drenă **4**, suficient de înalte. Cavitatea **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. 2. b., are drept arie activă cavitatea, sau zona "Nimic" - **5**, peste stratul de oxid - **2**, SiO₂. 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 cavitatea cu vid (sau vacuum) **5**, 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 curenților de drenă calculați analitic din fig. 5.a cu cei simulați printr-un tranzistor NOI, din fig. 5.b. 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 provoacă curentul de drenă,
- E_b este înălțimea barierei triunghiulare de potențial dinspre semiconductor către vid,
- d este distanța dintre insulele n+,
 λ 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 4nm.

Fig. 8.a prezintă vectorii de curent simulați și contururi colorate ale densității de curent printr-un tranzistor a-NOI cu $y_p = 1\text{nm}$, iar Fig. 8.b. 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 $V_S=0\text{V}$, $V_D=6\text{V}$, $V_G=2\text{V}$ 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} .

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 că NOI este limita (a-NOI), când grosimea filmului p, notată cu d , tinde la zero: $\text{NOI} = \lim_{d \rightarrow 0} (\text{a-NOI})$.

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

- se pornește de la o plachetă SOI Siliciu pe izolator cu un strat inițial monocristalin **10**, din siliciu de tip p gros de $10 \div 50 \text{ nm}$, lung de $50 \div 100 \text{ nm}$ peste un oxid gros de $50 \div 100 \text{ nm}$. Fig. 3.a prezintă placheta SOI de start. Dacă grosimea inițială a stratului p depășește 100nm, se aplică tehnici de subțiere. De asemenea, se poate ajusta doparea filmului p, prin impurificări adiționale. Fig. 3.a. 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 transforma în alte repere, pe măsura procesării tehnologice.

- se definesc în cadrul primului proces de mascare insulele n+, de Sursă și Drenă, dopate controlat cu impurități donoare (Fosfor). Distanța dintre ele trebuie să fie de maxim $4 \div 5$ nm. Insulele n+ se dopează la nivelul $10^{19} \div 10^{21}$ cm⁻³. Fig. 3.b prezintă aplicarea Măștii 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**.

- 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 se poată lăsa un film p extrem de subțire - **9** - sub 2nm, peste oxid, în cazul tranzistoarelor a-NOI. În cazul tranzistoarelor NOI, corodarea siliciului p se face până la eliminarea completă a sa. Fig. 3.c. 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 filmul p, rezultă structura a-NOI. Dacă timpul de corodare este încă puțin crescut, astfel încât se atinge oxidul, se obține structura NOI.

- 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. 3.d. prezintă structura finală, după eliminarea fotorezistului de mascare, cu metalizările de Sursă, Drenă și Poartă, pentru tranzistorul aproape NOI, a-NOI. Fig. 3.e. prezintă structura finală cu metalizările de Sursă, Drenă și Poartă, pentru tranzistorul NOI.

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

Tranzistoarele cu efect de câmp NOI și a-NOI, nu necesită tehnologii costisitoare de obținere a cavității vidate, deoarece numărul de molecule de aer, în condiții atmosferice obișnuite (presiune 1atm, temperatura 300K), aflate într-un volum de cca 100nm³ pentru regiunea "Nimic" - cavitataea **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 cavitate. De aici, performanțele deosebite în zgomot, întocmai ca la tuburile cu vid. Fig. 3. a ÷ e, prezintă etapele tehnologice de realizare a produsului și structurile NOI finale.

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

- Modelele adoptate în ATLAS pentru definirea cât mai fidelă a unei structuri reale NOI au fost: modelul SRH pentru rata netă de recombinare, dependența mobilităților de câmpurile laterale prin intermediul funcției fldmob, modificarea mobilităților purtătorilor în vecinătatea suprafețelor prin funcția surfmob, tunelarea Bandă-Bandă și cea Fowler Nordheim prin funcțiile bbt.std și fnord, distribuția Fermi-Dirac pentru electronii din insulele semiconductoare puternic dopate, mesh la distanțe uni-atomice pe axele Ox, Oy pentru interpretarea nodurilor ca atomi, sarcina de la interfața cu oxidul de 5×10^{10} e/cm², 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 $V_S=0V$, tensiunea pe Drena (**D**) a fost ridicată de la $V_D=0V$ la $V_D=4V$ și uneori până la $V_D=8V$, 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 +3V. În aceste simulări parametrii constructivi ai tranzistorului au fost: $x_{n+}=3nm$, $y_{n+}=7nm$, $N_D=10^{19}cm^{-3}$, $d=3nm$, $y_{ox}=10nm$, $y_p=1nm$. Fig. 5.a. prezintă caracteristici de ieșire calculate analitic cu modelul (1) ale unui tranzistor NOI pentru 3 distanțe dintre insulele n+. Alăturat, în fig. 5.b, sunt prezentate caracteristici de ieșire simulate ale aceluiași tranzistor NOI, pentru diverse tensiuni V_G aplicate pe poartă. Parametrii constructivi ai tranzistorului au fost: $x_{n+}=3nm$, $y_{n+}=7nm$, $N_D=10^{19}cm^{-3}$, $y_{ox}=10nm$, $y_p=0nm$, și distanța $d=3nm$ în cazul 5.b.

- 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 $V_S=0V$, tensiunea pe poarta (**G**) a fost ridicată de la $V_G=0V$ la $V_G=8V$, menținând tensiuni constante aplicate pe drenă, $V_{D1}=0.3V$, $V_{D2}=3V$, $V_{D3}=10V$. 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 nelinier 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 $V_{DS}=+1V$, când tensiunea pe poarta Gate a fost ridicată de la 0 la +3V. Fig. 6.a conține rezultatele pentru siliciu, iar fig. 6.b pentru diamant - ca materiale semiconductoare peste oxid. Pentru ambele materiale, caracteristicile acestor nanodispozitive prezintă maxime doar pentru grosimi ale filmului p sub 10nm. Curbele I_D-V_{GS} devin crescătoare cu prag, ca la tranzistoarele SOI-MOSFET obișnuite, dacă grosimea filmului p depășește 10nm, la ambele materiale.

- Figura fig. 7 prezintă mai multe analize comparative ale caracteristicilor de transfer ale tranzistoarelor NOI fără film p. Fig. 7.a. compară caracteristicile, pentru 3 tipuri de dopări N_D : $10^{20}cm^{-3}$ uniform, $7 \times 10^{20}cm^{-3}$ uniform și $7 \times 10^{20}cm^{-3}$ gaussian. Se dovedește că sensibilitatea maximă în transconductanță o oferă doparea maximă uniformă. Fig. 7.b. 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.

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 caracteristicilor de ieșire cu prag, tranzistoarele NOI se *pot fi utilizate* la implementarea circuitelor integrate digitale. Liniaritatea bună ale caracteristicilor de transfer, pe anumite domenii ale tensiunii de 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 nu se manifestă absolut deloc saturația caracteristicilor. Dar, tranzistoarele a-NOI *pot fi aplicate* în realizarea oscilatoarelor miniaturizate, comparatoare integrate la nivel de dispozitiv, 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 semiconductoare actuale, fără tehnici adiționale scumpe pentru realizarea nano-cavității, conform fluxului tehnologic prezentat în această propunere de brevet.

45

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, 4), semiconductoare puternic dopate n+ și înalte, legate între ele printr-un film (9) semiconductor de tip p cu grosimi sub 4nm, ce permite deasupra sa existența unei cavități (5) cu vacuum ce ocupă întreg spațiul dintre insulele n+, iar insulele n+ (3, 4) sunt legate la terminalul sursă (6) și terminalul drenă (7), pe spatele structurii (1) fiind plasat terminalul poartă (8).

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.

3. Tranzistorul conform revendicării 1, **caracterizat prin aceea că** pe stratul (2) de oxid de siliciu, sunt dispuse cele două insule (3, 4) semiconductoare puternic dopate n+ și înalte, despărțite de o cavitate (5) cu vacuum, ce permite tunelarea între insulele n+, iar insulele n+ (3, 4) sunt legate la terminalul sursă (6) și terminalul drenă (7), pe spatele structurii (1) fiind plasat terminalul poartă (8).

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, ne-convenționale.

5. Tranzistoare cu efect de câmp conform revendicărilor 1 și 3, **caracterizate prin aceea că** materialul semiconductor utilizat în construcția lor 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.

6. Procedeu de realizare a tranzistoarele conform revendicărilor 1 și 3, **caracterizate prin aceea că** constă din următorii pași:

- 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 10nm;

- se aplică tehnici de subțiere a filmului (10) până la zeci de nanometri și se ajustează doparea filmului p, prin impurificări adiționale;

- se definesc în cadrul primului proces de mascare insulele n+, de Sursă și Drenă, dopate controlat cu impurități donoare (Fosfor), distanța dintre ele fiind de maxim $4 \div 5$ nm, insulele dopându-se la nivelul $10^{19} \div 10^{21}$ cm^{-3} doar în zonele de sursă și drenă, ce vor deveni insulele n+ (3) și (4);

- 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 2nm, peste oxid, în cazul tranzistoarelor a-NOI, și 0nm în cazul tranzistoarelor NOI și o cavitate (5) între insulele n+ atât la a-NOI cât și la NOI;

- 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;

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

Desenele

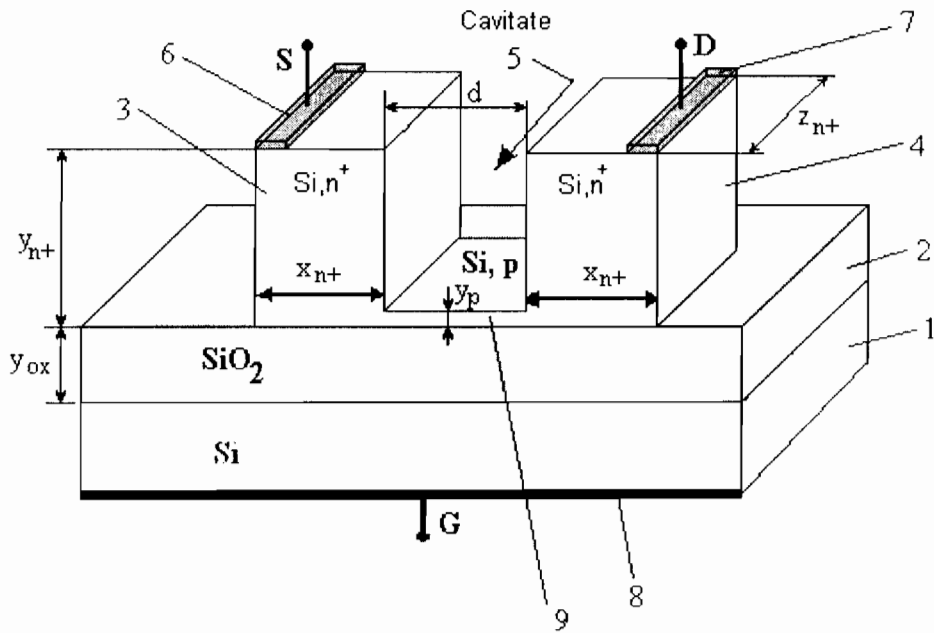


Fig. 1.

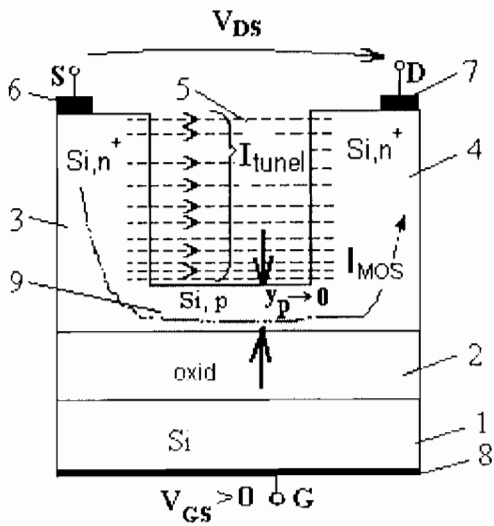
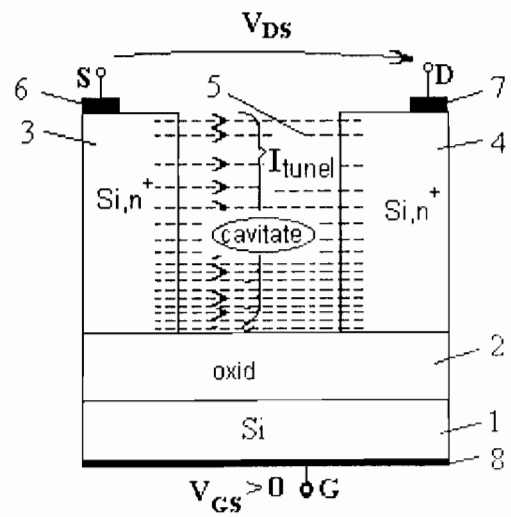


Fig.2. (a)



(b)

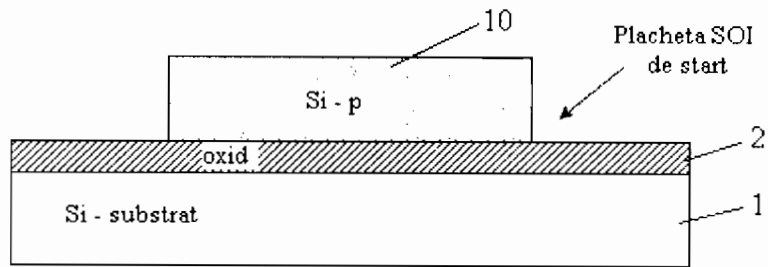


Fig. 3.a.

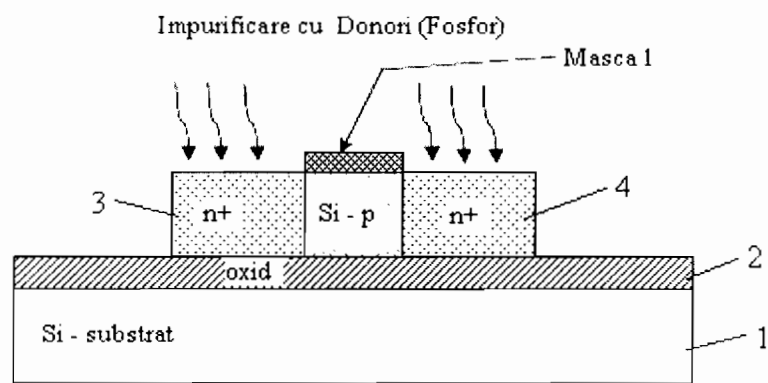


Fig. 3.b.

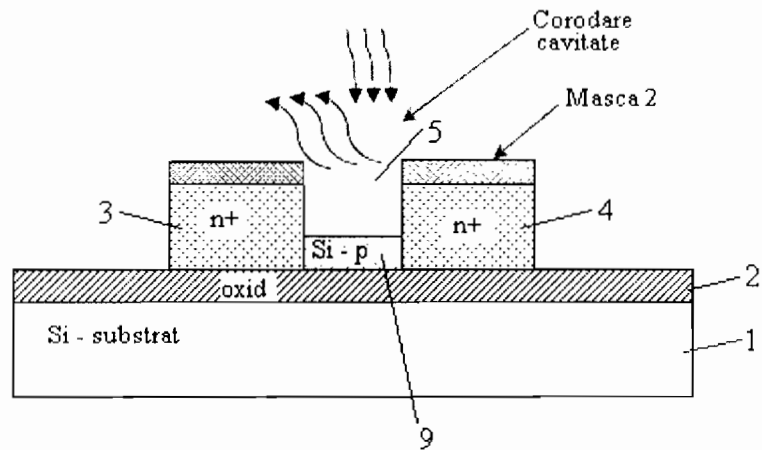


Fig. 3.c.

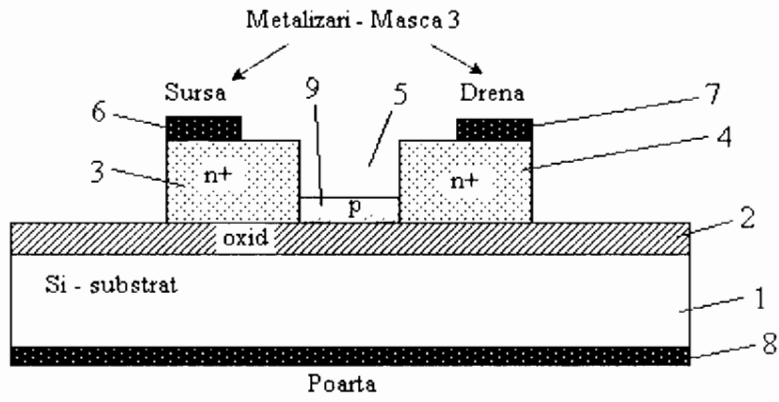


Fig. 3.d.

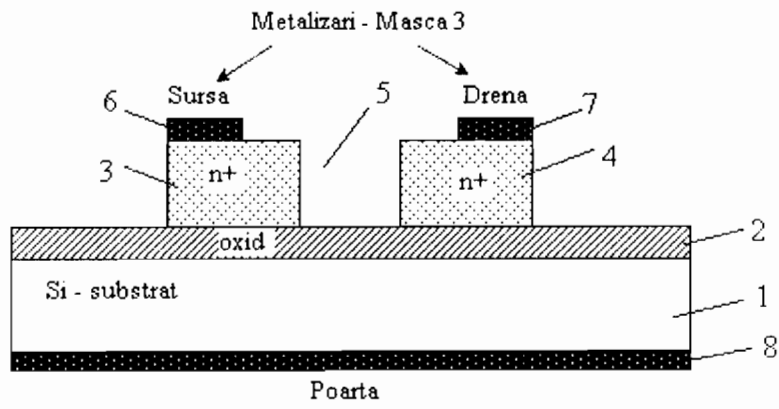


Fig. 3.e.

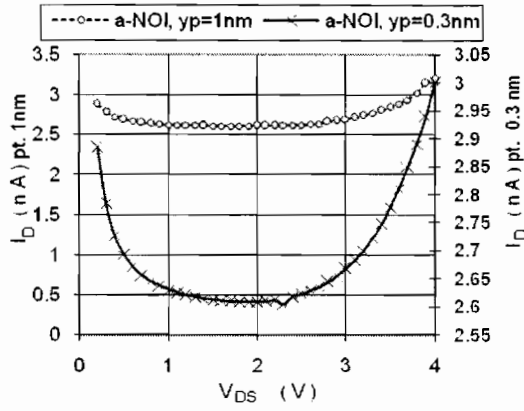


Fig. 4.

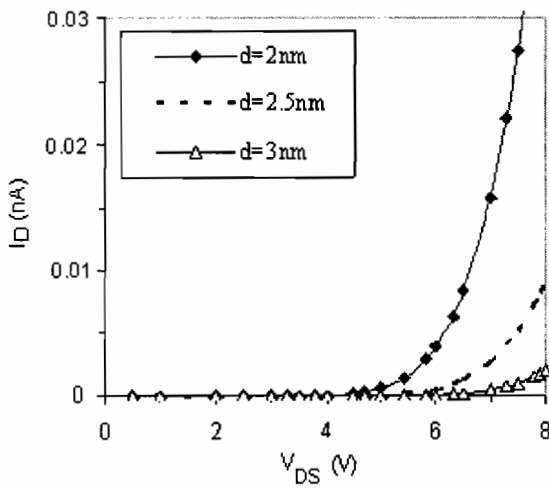
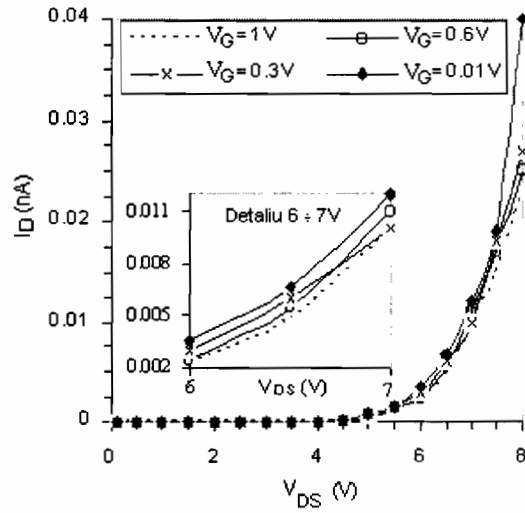


Fig.5. (a)



(b)

239

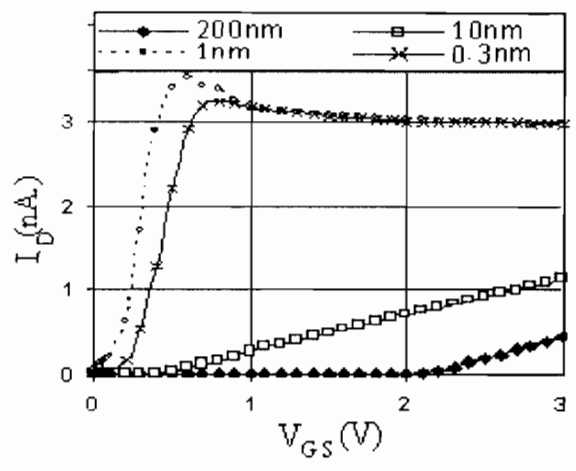
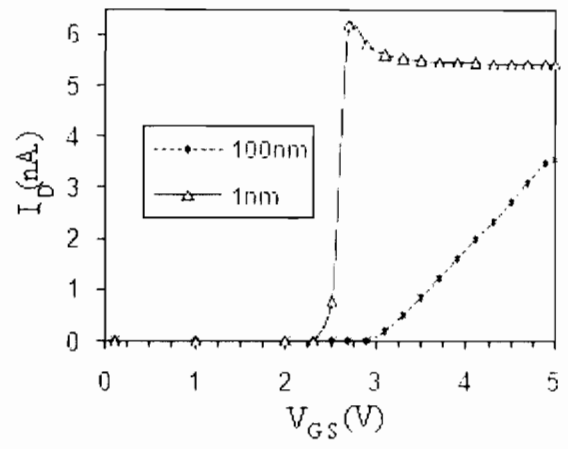


Fig. 6. (a)



(b)

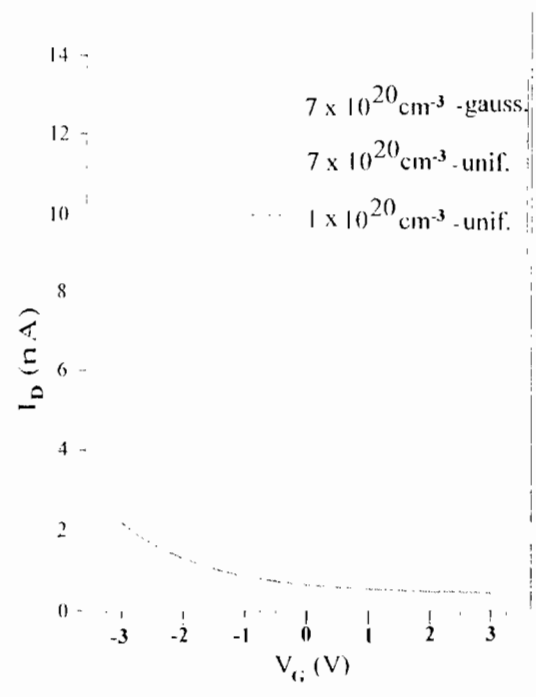
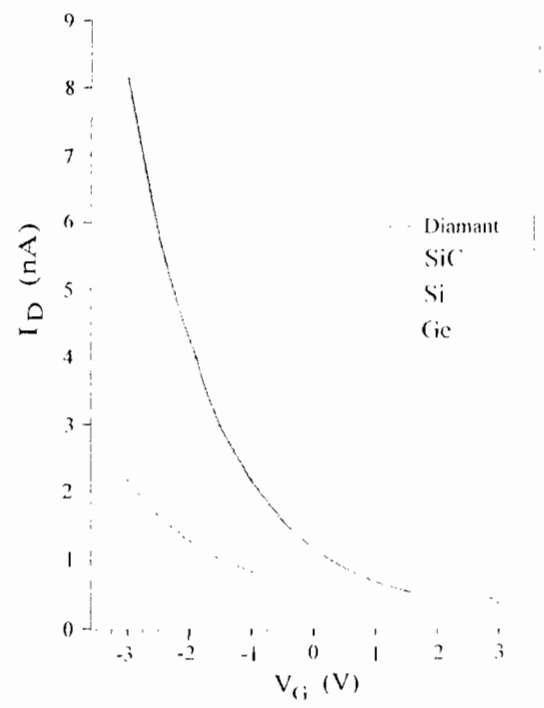


Fig. 7. (a)



(b)

Rara

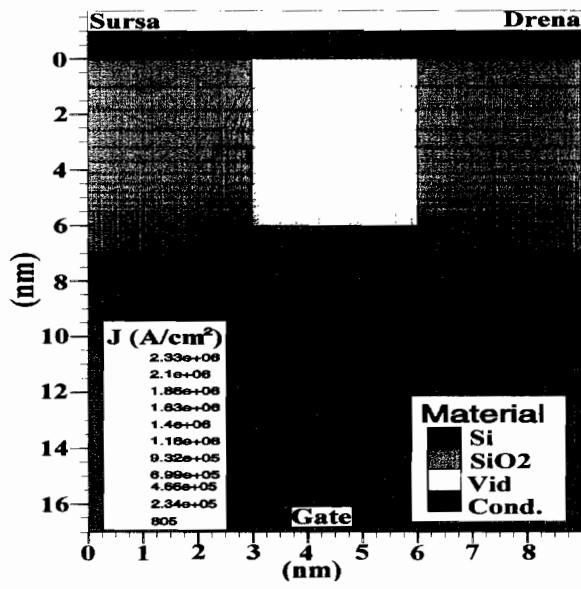
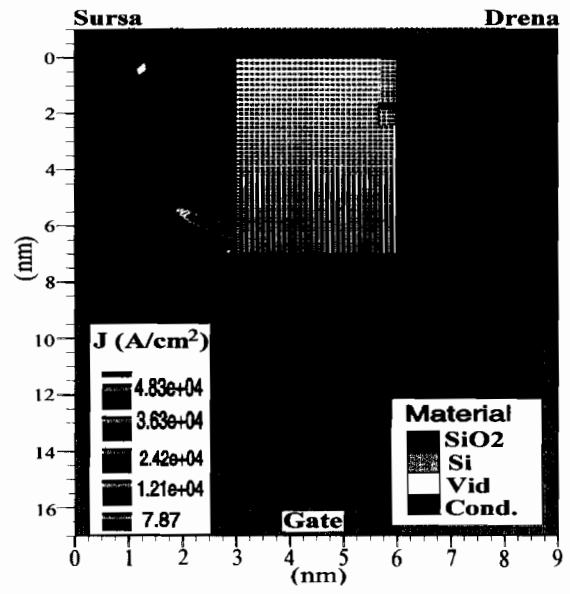


Fig. 8. (a)



(b)