

E. Jelenković, Lj. Pavlović, Lj. Mladenović  
 S. Pantić, V. Zdravković, V. Simonović  
 ROO 'Ei- Mikroelektronika'  
 Bul. V. Vlahovića 80-82  
 18000 Niš

## ELEKTRIČNO PROGRAMIRLJIV POLISILICIJUMSKI PMOS TRANZISTOR SA SiO<sub>2</sub>

## ELECTRICALLY PROGRAMMABLE POLYSILICON PMOS TRANSISTOR WITH SiO<sub>2</sub>

*Sadržaj: U okviru ovog rada razmatrani su jednostruko programirljivi PMOS tranzistori, koji su dobijani narastanjem tankog oksida (~ 15nm) na drejnu tranzistora. Ovakvi tranzistori su neaktivni. Nakon razaranja na drejnu, invertovanjem podloge ispod oksida gejta i dovodjenjem programirljivog napona na izvod drejna, prevode se u 'normalne' tranzistore. U zavisnosti od vrednosti napona na gejtu i drejnu tokom programiranja, dobijaju se izlazne karakteristike programiranog tranzistora koje su naročito degradirane u linearnom delu izlaznih karakteristika, u poređenju sa normalnim tranzistorima. Takođe je razmatran uticaj trajanja programiranja na izlazne karakteristike programiranog tranzistora. Nadjeno je da se proboj oksida na drejnu dešava unutar 3V ispod maksimalnog probojnog napona, bez obzira na debljinu programirljivog oksida.*

*Abstract: In this work one-fold programmable PMOS transistors, which were obtained growing a thin oxide layer (~ 15nm) on drain area were investigated. Such transistors are inactive. Destroying the drain oxide, by inverting the substrate below the gate and by applying a programmable voltage over the drain electrode, they are converted into 'normal' transistors. Output characteristics of programmed transistors are especially degraded in linear region, in comparison with normal one, and depend on gate and drain voltage level during the programming cycle. The influence of programming time on output characteristics of programmed transistor is also investigated. It was found that the breakdown of oxide is distributed within 3V from the maximum breakdown voltage, no matter what is the oxide thickness.*

### 1. UVOD

Za dobijanje programirljivih komponenata u MOS tehnologijama najčešće korišćeni filmovi su oksidni i nitridni /1/, mada su se poslednjih godina pojavili radovi i sa polisilicijumskim programirljivim filmovima /2,3/. Neke predložene komponente iz grupe polisilicijumskih programirljivih integrisanih kola spadaju u

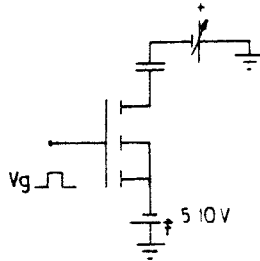
grupu jednostruko električno programirljivih kola /3,4/ kod kojih se visokootporni polisilicijumski film pod dejstvom električnog polja prevodi u niskootporni. Ova promena je stalne prirode. Nedostatak pomenutog pristupa leži u dodatnom nanošenju polisilicijuma i potrebi njegovog kontrolisanog dopiranja.

Na moguću novu klasu jednostruko programirljivih MOS IK ukazano je nedavno /5/. Kod nje se predviđa korišćenje silicijum-dioksidnog izolatorskog filma. Naime, kod ovih programirljivih komponenata se pre nanošenja metalnog filma narasta i definiše oksidni film na drejnu PMOS tranzistora. Tranzistor sa ovako napravljenim drejnom je svakako neaktivan bez obzira na napon na gejtu i napon na drejnu ispod napona proboja. Dovodjenjem podloge ispod gejta, ovakvog PMOS tranzistora, u inverziju odgovarajućim naponom na njegovom gejtu i polarisanjem drejna negativnim kritičnim naponom, dolazi do razaranja umetnutog oksida i uspostavljanja relativno dobrog kontakta izmedju aluminijuma i jako dopirane drejnovske oblasti. Referenca /5/ se bavi tranzistorom u aluminijum gejt tehnologiji, dok se ovim radom pokušava da ispita mogućnost primene ove, proste, ideje u poli-gejt tehnologiji. Primamljivost ovog pokušaja leži i u činjenici da je za ostvarenje ovakvog jednostrukog programirljivog tranzistora potrebna samo jedna dodatna termička oksidacija, koja značajno ne remeti difuzione profile, i dodatni fotopostupak za koji se pokazuje da nije kritičan /5,6/. Drugim rečima, predloženi programirljivi tranzistor može da se napravi korišćenjem standardne polisilicijumske MOS tehnologije sa neznatnim dopunama.

## 2. OPIS EKSPERIMENTA

Za pripremu uzoraka korišćene su n-silicijumske pločice orijentacije (100), prečnika 7.62cm i specifične otpornosti 4-7 Ohm cm. Procesirane po standardnom tehnološkom nizu CDP 1800 mikroprocesorske serije, zaključno sa otvaranjem kontakata. Nakon toga je usledila termička oksidacija u H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> TCA atmosferi na 800°C, a u skladu sa ranije dobijenim rezultatima /5,6/, gde je debljina oksida određena elipsometrijski. Narastajući selektivno programirljivi oksid na drejnovskom kontaktnom otvoru, ali svakako i na drugim kontaktnim otvorima, pretpostavljajući da je kontaktni otvor dovoljno veliki tako da ne smanjuje brzinu oksidacije i da ona bitno ne zavisi od površinske koncentracije bora. Na ovaj način dobijeni su programirljivi oksidi debljine 14 i 16.5 nm. Nakon P+ oksidacije usledio je fotopostupak na njemu tako da je sa svih kontaktnih mesta, osim sa drejna programirljivog tranzistora, uklonjen oksid. Posle toga nastavilo se standardnim tehnološkim nizom. Za definisanje likova tranzistora korišćen je posebno projektovan testni čip koji je sadržao programirljive i normalne tranzistore. Površina kontaktnog otvora drejna na kome je sprovedeno narastanje programirljivog oksida iznosila je 50  $\mu\text{m}^2$ .

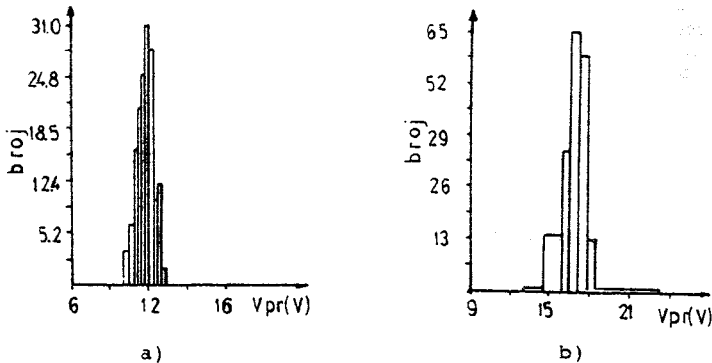
Merenje i programiranje dobijenih čipova radjeno je traser-ski i na automatskom proberu TERADYNE J-325. Programovanje tranzistora sprovedeno je prema shemi sa slike 1.



Slika 1. Shema programiranja PMOS tranzistora, TERADYNE J-325

### 3. PRIKAZ REZULTATA

Tokom traserskog merenja probojnog napona oksida može da dodje do znatne degradacije, ukoliko radi tačnijeg uočavanja proboja merenje duže traje /7/. U zavisnosti od kvaliteta oksida i trajanja merenja ova greška može da bude i veća od 1V /8/. Stoga će se za dalje potrebe ovog rada, u cilju izbegavanja moguće greške, uvažavati rezultati dobijeni merenjem na automatskom programu TERADYNE J-325.



Slika 2. Raspodela probojnih napona programirljivog oksida u PMOS tranzistoru;

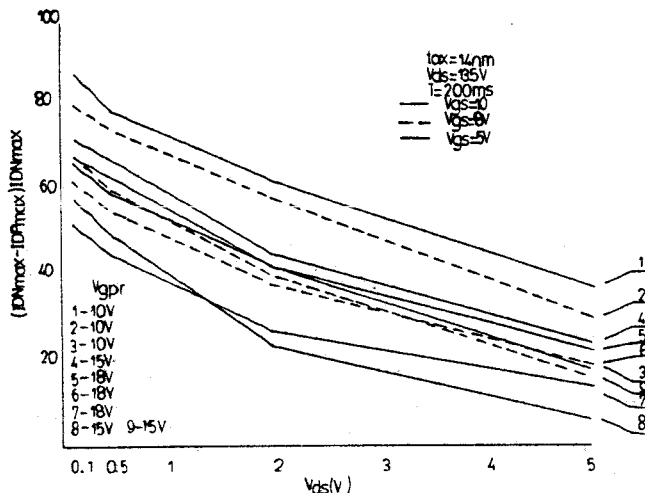
a. dox = 14 nm ; broj merenih tranzistora je 156;

b. dox = 16.5 nm; broj merenih tranzistora je 192.

Probojni napon programirljivog oksida meren je pri 200 nA, a za fiksnu amplitudu signala na gejtju. Za ostvarene debljine ovog oksida dobijeni su histogrami prikazani na slici 2. Oni probijaju

u naponskom opsegu koji je za oko 3-4 V niži od maksimalnog probojnog napona, bez obzira na debljinu.

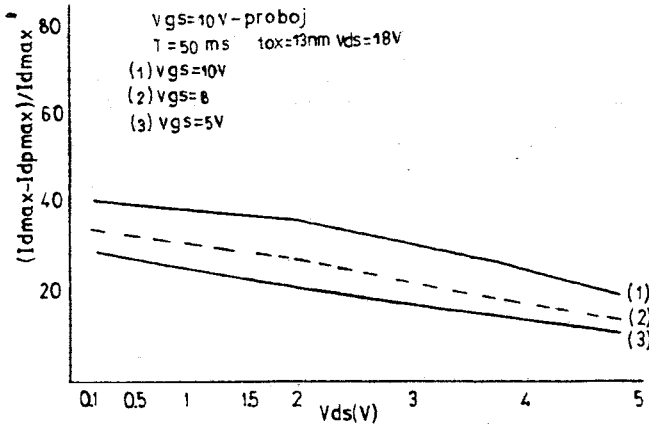
Nakon programiranja tranzistora na traseru uporedjene su neke njihove karakteristike sa karakteristikama normalnih tranzistora sa istog peleta. U pogledu praga, merenog na 5 i 10  $\mu\text{A}$  tipična razlika između normalnog i programiranog tranzistora nije iznosila više od 2-3%. U pogledu probojnog napona S-D između ovih tranzistora nije bilo nikakve razlike.



Slika 3. Maksimalni relativni odnos izlaznih struja drena programiranog i normalnog tranzistora u zavisnosti od napona na drejni;  $t_{\text{prog}} = 200 \text{ ms}$ ;  $V_{\text{dspr}} = 13.5 \text{ V}$

Poredjenje izlaznih karakteristika je za potrebe ovoga rada prikazano na osnovu merenja na automatskom proberu. Kako je očekivano da tokom 'nasilnog' uspostavljanja kontakta na drejni ne dolazi do uspostavljanja dobrog omskog kontakta, a što je potvrđeno prethodnim radom /5/, merene su izlazne struje programiranih i normalnih tranzistora sa istog peleta za razne vrednosti napona na drejni. Odnos struje drena programiranog i normalnog tranzistora za napone na gejtju od -5, -8 i -10V, za niz merenja (6-27 merenja za jedan I-V par) prikazan je na slici 3. Pri tom je prikazan najgori moguć slučaj: najveća struja drena normalnog tranzistora i najmanja struja drena programiranog tranzistora iz niza merenja za jedan I-V par, to jest izabran je i najnepovoljniji način poredjenja sa stanovišta programirljivog tranzistora. Indeks 'pr' uz naponske oznake na prethodnoj slici odnosi se na vrednosti ovih tokom programiranja. Za četiri puta kraće vreme programiranja, a istu debljinu oksida, relativni odnos struja programiranog i normalnog tranzistora prikazan je na slici 5, za slučaj vrlo velikog napona na drejni tokom programiranja  $-V_{\text{dspr}} = 18 \text{ V}$ . (Napomena: Na slikama 2-5 su

naznačene apsolutne vrednosti napona na drejnu i gejtu).



Slika 4. Maksimalni relativni odnos izlazne struje drejna programiranog i normalnog tranzistora;  $t_{ox} = 14$  nm;  $V_{dspr} = 18V$ ,  $V_{gspr} = 10V$ .

Slike 3 i 4 pokazuju da postoji izvesna zavisnost izlaznih struja programiranih tranzistora u zavisnosti od vremena programiranja. Stoga je sprovedeno programiranje za tri razlicita vremena, zadržavajući sve naponske uslove iste. Uticaj vremena programiranja na izlazne karakteristike tranzistora, takodje za tanji oksid, prikazan je na slici 4.

#### 4. ANALIZA REZULTATA

Programirljivi oksid u PMOS tranzistoru je u pogledu debljine, a time i sa stanovišta probojnog napona, ograničen sa donje i gornje strane. Naime, ne sme da ima probojni napon veći od predviđenog maksimalnog napona odgovarajućom tehnologijom. To je glavni razlog što se debljem oksidnom filmu u narednom tekstu poklanja manja pažnja. Ograničenje sa donje strane je uslovljeno maksimalnim dozvoljenim radnim naponom kola u koje se programirljivi tranzistor ugrađuje. Pored toga, do degradacije oksida, pa i do njegovog proboja, dolazi i pri naponima nižim od probojnog /7,8/, te je to dodatni razlog da donja granica probojnog napona bude što dalja od radnog napona. Zadržavajući se na slici 2.a, čijoj minimalnoj i maksimalnoj vrednosti probojnog napona odgovaraju vrednosti polja od 6,7 MV/cm 9,3 MV/cm, dolazi se do zaključka, barem dok važi pretpostavka o generaciono-rekombinacionom mehanizmu koji dovodi do proboja /9/, da u oblasti radnih napona kola sa programirljivim tranzistorom može da očekuje pouzdan rad ovakvog kola. Naravno da se pritom ima u vidu donja granica radnog napona kola mikroprocesorske serije CDP 1800 /10/. Stoga se može da kaže da je dobijena raspodela probojnih napona sa slike 2.a zadovoljavajuća. Svakako da je interesantno da se utvrdi, sa stanovišta pouzdanosti oksida, naelektrisanje koje treba da se propusti kroz njega da bi došlo

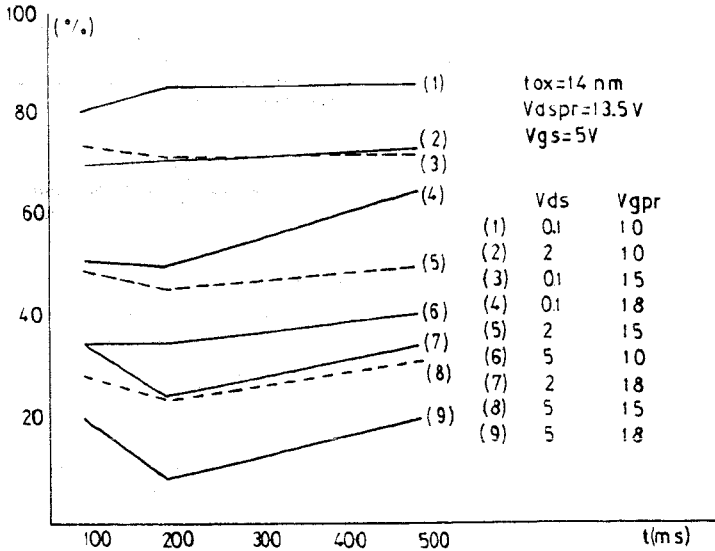
do proboja /7/, što bi predstavljalo dopunu rezultatima vremena do proboja oksida na P+ silicijumskoj podlozi /5,6/. Mali 'rep' u raspodeli probojnih napona sa desne strane na slici 2.b ukazuje da nedovoljno uniformno vodjenje procesa oksidacije može da dovede do komponente koja ne može da se programira maksimalnim naponom za datu tehnologiju (ovde se pretpostavlja da i napon od 18V odgovara nekoj tehnologiji). Pojava neuniformnosti sa desne strane može da nametne znatne teškoće pri merenju kola sa programirljivim PMOS tranzistorom.

Uspostavljanje kontakta između aluminijuma i borom dopirane oblasti drejna kroz silicijumoksid jeste trajna promena, to jest, omogućuje samo jednostruko programiranje određenog tranzistora u integrisanom kolu. Samo programiranje, za slučaj uzoraka sa najtanjim oksidom, mora da se obavi naponom koji je barem za deseti deo volta viši od maksimalnog probojnog napona sa slike 2.a, jer probojni napon nije definisan katastrofalnim probojem. Nakon uspostavljanja kontakta između aluminijuma i silicijuma izlazne karakteristike tranzistora pokazuju znatnu degradaciju, naročito u oblasti malih vrednosti napona na drejnu, što je prikazano na slici 3. U oblasti zasićenja degradacija izlazne struje tranzistora je manja, i iznosi od nekoliko do četrdesetak procenta. Posledica je povećane kontaktne otpornosti na programiranom drejnu. Uočava se znatna zavisnost relativnog odnosa struja programiranog i normalnog tranzistora od napona na gejtju tokom programiranja. Ovaj odnos je bolji za slučaj  $V_{gpr} = 15V$  od onog za  $V_{gpr} = 10$ , ali ne i uvek za  $V_{gpr} = 18V$ . Očito je da se bolji kontakt uspostavlja sa povećanjem struje kroz tranzistor koja se obezbeđuje većim naponom na gejtju. Izvesna odstupanja od ovakvog ponašanja mogu da se traže u relativno malom broju merenja za svaki par merenja (6-27). Takođe je u većini slučajeva relativni odnos struja dve vrste tranzistora, u zavisnosti od napona na gejtju, veća ukoliko je pri merenju napon na gejtju bliži naponu programiranja, što takođe ukazuje da se kontakt bolje uspostavlja ukoliko je struja tokom programiranja veća.

Da je za kvalitetnije programiranje presudniji napon na drejnu tokom programiranja od napona na gejtju pokazuje slika 4. Kod nje je nivo degradacije čak i u linearnoj oblasti svega oko 20%. Opet se uočava da su izlazne karakteristike bolje ukoliko je pri merenju napon na gejtju što manji.

Brzina programiranja je kod programirljivih kola vrlo važna osobina. Zato je u milisekundnom opsegu trajanja impulsa programiranja praečna veza između trajanja programiranja i relativnog odnosa struja programiranog i normalnog tranzistora. Na slici 5, koja prikazuje ovu zavisnost, uočava se tendencija pojave najmanje vrednosti za isti napon programiranja na gejtju. Ova i prethodna slika ukazuju da se pravilnim izborom napona programiranja, pre svega na drejnu, i vremena programiranja, koje je reda 200 ms, mogu dobiti izlazne karakteristike programiranog tranzistora sa najmanjim kontaktnim otporom.

Takođe je nadjeno da se kvalitet izlaznih struja programiranih tranzistora može donekle da odredi debljinom oksida, tj. tanji oksid daje manji kontaktni otpor. Medjutim, zbog zahteva pouzdanosti neprogramiranog oksida sa raspodelom probojnih napona koja je pomenena ka maksimalnom probojnom naponu, jasno je da se promenom debljine oksida ne treba da ide na poboljšavanje izlaznih karakteristika programiranih PMOS tranzistora.



Slika 5. Zavisnost  $(I_{dnmax} - I_{dprmin}) / I_{dmin}$  od vremena programiranja za različite napone programiranja.

## 5. ZAKLJUČAK

Koristeći poli-gejt tehnologiju realizovan je jednostruko programirljiv PMOS tranzistor. Kao programirljiv element iskorišćen je tanak silicijum oksidni film /5/, mada može i neki drugi /4/, koji je smešten u drejnovski kontakti otvor, između aluminijuma i P+ oblasti drejna.

Dobijena je prihvatljiva raspodela probojnih napona programirljivih oksida u PMOS tranzistoru, a stanovišta eventualne primene u IK, izradjenih CDP 1800 mikroprocesorskom tehnologijom.

Nakon programiranja tranzistora utvrđjena je povećana otpornost na drejnu. Došlo se do podataka da se ona može da smanji povećanjem struje tokom programiranja. Takođe je nadjeno da kvalitet programiranja može do izvesne mere da se reguliše trajanjem programiranja (reda stotinak ms) i debljinom samog programirljivog oksida.

Medjutim, bez obzira na izbor uslova programiranja, minimalno povećanje kontaktne otpornosti ne može da se izbegne. Ako je veličina struje odgovorna za uspostavljanje dobrog kontakta, moguće je da rešenje treba tražiti u programirljivom NMOS tranzistoru.

## LITERATURA

- /1/ S.M.Sze: "Physics of Semiconductor Devices", Mc Grow-Hill, N.Y. 1981
- /2/ Y.Fukuda, S.Konda, K.Masuda, Y.Kitand: "A New Fusible-Type Programmable Element Composed of Aluminium and Polysilicon", IEEE Tran. El. Dev., Vol. ED-33, No.2, 250, 1986
- /3/ M.Tanimoto, J.Murota, Y.Ohmori, N.Ieda: "A Novel MOS PROM Using a Highly Resistive Poly-Si Resistor", IEEE Tran. El. Dev., vol.ED-27, No.3, 517, 1980
- /4/ M.Tanimoto, J.Murota, M.Wada, T.Watanabe, K.Miura, N.Ieda: "A Novel 14V Programmable 4 Kbit MOS PROM Using a Poly-Si Resistor Applicable to On-Chip Programmable Devices", IEE J. Sol. St. Circ., vol.SC-17, No.1, 62, 1982
- /5/ E.Jelenković, Lj.Pavlović, M.Puletić, A.živić, S.Pantić: "A New Technique with Thin Silicodioxide Film for MOS PROMs", The 6th International Semicustom and Custom ICs Conference, Proc. 17.0, London 1986
- /6/ E.Jelenković, Lj.Pavlović, M.Puletić, S.Pantić: "Rast tankog silicijumdioksidnog filma na jako dopiranoj P+ podlozi i njegova električna svojstva", SD 1986
- /7/ I.-C.Chen, S.E.Holland, C.-M.Hu: "Electrical Breakdown in Thin Gate and Tunneling Oxides", IEEE J. Sol. St. Circ., Vol. SC-20, No.1, 333, 1985
- /8/ S.Holland, C.Hu: "Correlation Between Breakdown and Process Induced Positive Charge Trapping in Thin Thermal SiO<sub>2</sub>", J. Electr. Soc., Vol. 133, No.8, 1705, 1986
- /9/ N.Klein: "Breakdown Mechanisms of Thermally Grown Silicon Dioxide at High Electric Fields", Proc. of the Conf. on "The Physics and Technology of Amorphous SiO<sub>2</sub>", N.Y. 1987
- /10/ Katalog poluprovodničkih komponenti, Ei-Poluprovodnici, Niš, 1987