

MODIFIKOVANI KVAZI 2D MODEL NAPONA PRAGA KRATKOKANALNOG SOI MOSFET-a

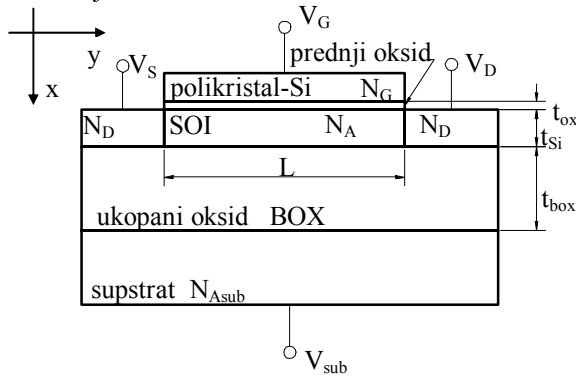
Milija Sarajlić, IHTM-Centar za mikroelektronske tehnologije i monokristale, Njegoševa 12, 11000 Beograd
Rifat Ramović, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bul. Kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd

Sadržaj – U radu je data modifikacija tzv. kvazi-dvodimenzionalnog modela SOI MOSFET tranzistora. Model je primenjen na efekat kratkog kanala, i efekat temperaturne zavisnosti napona praga. Dobijeno je dobro slaganje sa numeričkim i eksperimentalnim rezultatima.

1. UVOD

SOI MOSFET tranzistori danas spadaju među najznačajnije komponente u ULSI tehnologiji. Iako se pre deset godina smatralo da će to mesto preuzeti SOI MOSFET sa dvostrukim gejtom (Double Gate (DG)), ova tehnologija još uvek nije sazrela, tako da je SOI MOSFET sa jednim gejtom i dalje u centru pažnje [1].

Na sl. 1 je dat izgled poprečnog preseka potpuno osiromašenog (FD) SOI MOSFET tranzistora. Tipične dimenzije su date u tab. 1.



Sl. 1. Izgled tipičnog FD SOI MOSFET-a

Tabela 1: Tipične dimenzije FD SOI MOSFET tranzistora		
Debljina prednjeg oksida	t_{ox}	1 - 20 nm
Debljina aktivnog sloja	t_{si}	5 - 100 nm
Debljina zadnjeg oksida	t_{box}	100 nm (slaba implantacija) 150 nm (srednja implantacija) 380 nm (jaka implantacija)
Dopiranje aktivnog sloja	N_A	$10^{16} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Dopiranje sorsa i drejna	N_D	$10^{18} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
Dopiranje substrata	N_{Asub}	10^{20} cm^{-3}
Dopiranje gejta	N_G	10^{20} cm^{-3}

2. 1D MODEL

Napon praga zavisi od parametara tranzistora kao što su širina i dužina gejta, dopiranje i debljina aktivne oblasti i supstrata i debljina oksida [5]. Da bi se odredio, potrebno je rešiti 2D Poisson-ovu jednačinu u aktivnom sloju. 3D efekti se retko razmatraju jer se uzima da je širina kanala mnogo veća od njegove dužine, tipično i do 100 puta. Moguće je rešiti egzaktno 2D Poisson-ovu jednačinu u kanalu ali takvo rešenje je dato beskonačnim sumama u obliku Ležandrovih polinoma i nije od velike praktične koristi [3]. Zbog toga je učinjen napor da se nađe jednostavan analitički izraz za zavisnost napona praga od dužine kanala, izraz koji bi se mogao ugraditi u analizu prenosnih i izlaznih karakteristika tranzistora, i električnih kola u integrisanim sklopovima.

Najpre se daje procena napon praga SOI MOSFET-a koji ima beskonačno dugačak kanal, tj. $L \rightarrow \infty$. Aktivni sloj kod FD SOI MOSFET-a je veoma tanak tako da se aproksimacija potpunog osiromašenja može smatrati veoma tačnom, tj. svi manjinski nosioci će u opštem slučaju biti koncentrisani u tankom inverznom sloju na spoju aktivnog sloja i prednjeg oksida. Za slučaj p dopiranja SOI oblasti, tj. N-kanalnog SOI MOSFET-a, Poissonova jednačinana u 1D obliku će biti [3]:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \frac{qN_A}{\epsilon_{Si}} \quad (2)$$

Uz granične uslove na prednjem i zadnjem gejtju:

$$\epsilon_0 \frac{1}{\epsilon_{Si}} \left(-\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{V_G - V_{FB} - \phi_s}{t_{ox}} \frac{\epsilon_0}{\epsilon_{ox}} \quad (3)$$

$$\epsilon_0 \frac{1}{\epsilon_{Si}} \left(-\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{x=t_{Si}} = -\frac{V_{sub} - V_{FBsub} - \phi_b}{t_{box}} \frac{\epsilon_0}{\epsilon_{ox}} \quad (4)$$

gde je: $\phi(x=0) = \phi_s$

$$\phi(x=t_{Si}) = \phi_b$$

V_{FB} - napon ravnih zona na prednjem gejtju [2]:

$$V_{FB} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_G}{n_i^2} \right) \quad (5)$$

V_{FBsub} - napon ravnih zona na zadnjem gejtju [2]:

$$V_{FBsub} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_{Asub}}{N_A} \right) \quad (6)$$

Uvodi se oznaka:

$$\gamma \equiv \frac{\epsilon_{Si}}{\epsilon_0} \quad (7)$$

Tada će potencijal u kanalu biti:

$$\phi(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_{Si}} x^2 - \frac{\gamma}{t_{ox}} (V_G - V_{FB} - \phi_s) x + \phi_s \quad (8)$$

Odavde se dobija veza napona na gejtju i površinskog potencijala ϕ_s :

$$V_G = V_{FB} + \phi_s + \frac{t_{ox}}{t_{box} + \gamma t_{Si}} \left[\phi_s - V_{sub} + V_{FBsub} + \frac{qN_A}{2\gamma\epsilon_{Si}} t_{Si} (2t_{box} + \gamma t_{Si}) \right] \quad (9)$$

Uzima se da napon praga odgovara inverziji u kanalu, tj. kada je koncentracija manjinskih nosilaca u prednjem kanalu jednaka koncentraciji dopiranja aktivnog sloja. To znači da će potencijal ϕ_s biti jednak dvostrukom Fermijevom nivou: $\phi_s = 2\phi_f$ gde je [2]:

$$\phi_f = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right). \quad (10)$$

Sada je napon praga:

$$V_{thL} = V_{FB} + 2\phi_f + \frac{t_{ox}}{t_{box} + \gamma t_{Si}} \left[2\phi_f - V_{sub} + V_{FBsub} + \frac{qN_A}{2\gamma\epsilon_{Si}} t_{Si} (2t_{box} + \gamma t_{Si}) \right] \quad (11)$$

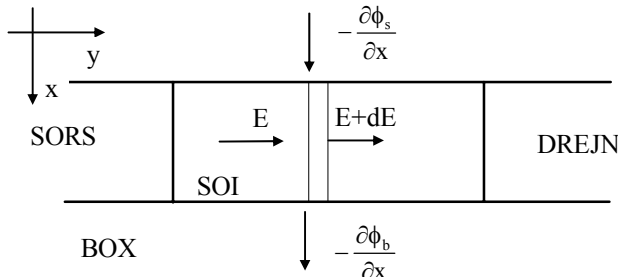
3. KVAZI 2D MODEL

Da bi se našla raspodela električnog potencijala u aktivnom sloju potrebno je rešiti dvodimenzionalnu Poasonovu jednačinu. Ovo nije jednostavan problem, i zato se koriste razne aproksimacije. Ovde prikazujemo tzv. kvazi 2D pristup [3]. Uzima se jedan isečak iz aktivnog sloja SOI MOSFET-a, duž y ose, tj. od prednjeg ka zadnjem gejtju (sl. 2). Primenjuje se Gausova teorema:

$$-t_{Si}(E + dE - E) - \left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_{x=0} dy - \left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_{x=t_{Si}} dy = \frac{qN_A}{\epsilon_{Si}} t_{Si} dy \quad (12)$$

uz pretpostavku da je transverzalno električno polje isto duž x ose. Ovde se ne računa tzv. rubno polje (fringing field), koje je uzrok nagomilavanja nosilaca na zadnjem gejtju. Odavde se dobija diferencijalna jednačina za E(y) [3]:

$$-\epsilon_{Si} t_{Si} \frac{\partial E}{\partial y} + \frac{\gamma}{t_{ox}} (V_G - V_{FB} - \phi_s(y)) + \frac{\gamma}{t_{box}} (V_{sub} - V_{FBsub} - \phi_b(y)) = qN_A t_{Si} \quad (13)$$



Sl. 2. Izgled kvazi 2D pristupa

Veza između ϕ_s i ϕ_b nalazi se iz (8):

$$\phi_b = \frac{qN_A}{2\epsilon_{Si}} t_{Si}^2 - E_s t_{Si} + \phi_s \quad (14)$$

gde je: E_s električno polje na prednjem gejtju. Konačno, dobija se diferencijalna jednačina za potencijal na prednjem gejtju u obliku:

$$-\frac{\partial^2 \phi_s}{\partial y^2} + \frac{1}{\lambda^2} \phi_s + \beta = 0 \quad (15)$$

gde je:

$$\lambda = \sqrt{\frac{t_{Si} t_{box} t_{ox}}{\gamma(\gamma t_{Si} + t_{box} + t_{ox})}} \quad (16)$$

tzv. korelaciona dužina, i

$$\beta = -\frac{(V_G - V_{FB})\gamma(\gamma t_{Si} + t_{box})}{t_{Si} t_{box} t_{ox}} \quad (17)$$

$$-\frac{\gamma}{t_{Si} t_{box}} \left(V_{sub} - V_{FBsub} - \frac{qN_A}{2\epsilon_{Si}} t_{Si}^2 \right) + qN_A$$

konstanta integracije. Prema ovom modelu, zavisnost napona praga od dužine kanala data je izrazom [3]:

$$V_{th} = V_{thL} - \frac{t_{box} + \gamma t_{Si}}{t_{box} + t_{ox} + \gamma t_{Si}} \frac{[2(V_{bi} - 2\phi_f) + V_D]}{2ch(L/2\lambda) - 2} \quad (18)$$

Na sl. 3 prikazan je isprekidanim linijama napon praga izračunat pomoću kvazi 2D teorije. Parametri SOI MOSFET-a su: $t_{ox}=1.5\text{nm}$, $t_{box}=100\text{nm}$, $t_{Si}=10\text{nm}$, $N_A=3\cdot 10^{18}\text{cm}^{-3}$, $N_D=10^{20}\text{cm}^{-3}$, $N_G=2\cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}$. Vidi se odstupanje od numeričkih rezultata dobijenih programom MEDICI [2].

4. MODIFIKOVANI KVAZI 2D MODEL

Modifikacija koju uvodimo sastoji se u sledećem: uzdužno po kanalu primenićemo aproksimaciju totalnog osiromašenja na pn spoju. Na spoju sors-SOI imaćemo sledeću zavisnost potencijala [4]:

$$V(y) = \frac{qN_A}{2\epsilon_{Si}} y^2 - E_{m1}y + V_{bi}, \quad (19)$$

na spoju SOI-drejn [4]:

$$V(y) = \frac{qN_A}{2\epsilon_{Si}} (L-y)^2 - E_{m2}(L-y) + V_{bi} + V_D \quad (20)$$

$$\text{gde je [4]: } E_{m1} = \sqrt{\frac{qN_A V_{bi}}{\epsilon_{Si}}}, \quad E_{m2} = \sqrt{\frac{qN_A (V_{bi} + V_D)}{\epsilon_{Si}}} \quad (21)$$

U slučaju velike razlike u dopiranju aktivne oblasti i sorsa odnosno drejna (tipično 100 puta je aktivna oblast manje dopirana), prostorni tovar će se prostirati skoro samo u aktivnoj oblasti. Širina oblasti prostornog tovara na spoju sors-SOI je [4]:

$$y_{p1} = 2\sqrt{\frac{\epsilon_{Si} V_{bi}}{qN_A}}, \quad (22)$$

a na spoju SOI-drejn [4]:

$$y_{p2} = 2\sqrt{\frac{\epsilon_{Si} (V_{bi} + V_D)}{qN_A}} \quad (23)$$

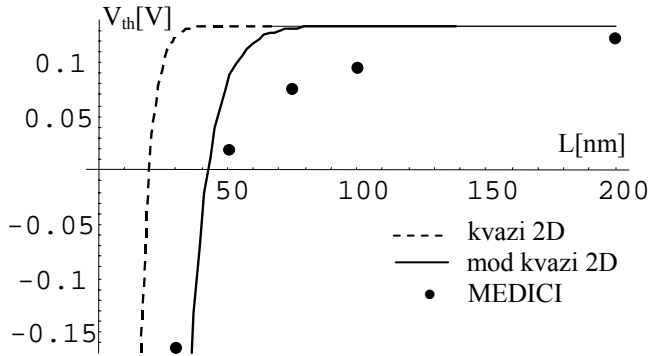
Kada je dužina kanala manja od kritične dužine

$$L_c = y_{p1} + y_{p2} \quad (24)$$

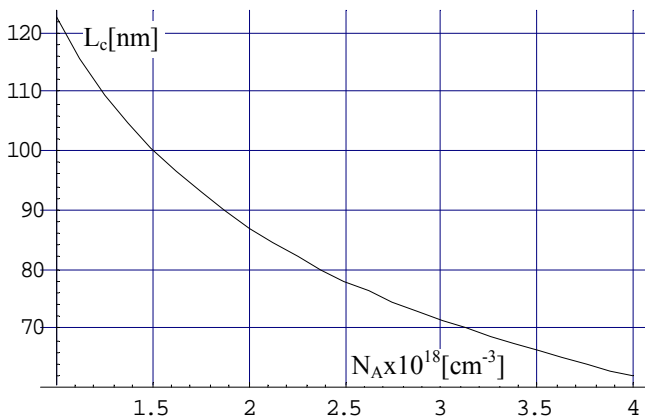
tada će se pojaviti efekat kratkog kanala. Znajući ovo možemo modifikovati kvazi 2D teoriju. Na sl. 4 je data zavisnost kritične dužine kanala L_c od dopiranja aktivnog sloja. S obzirom da se u (18) efekat kratkog kanala pojavljuje preko izraza $(\cosh(L/2\lambda)-1)^{-1}$, jasno je da se mora uzeti veća korelaciona dužina da bi se dobilo bolje poklapanje kvazi 2D teorije sa numeričkim proračunom. Uzećemo da se efekat kratkog kanala pojavljuje kada je:

$$(\cosh(L/2\lambda)-1)^{-1} = 0.0005, \quad (25)$$

tj. kada se napon praga promeni za 0.05% od vrednosti za dugi kanal. Za parametre SOI MOSFET-a : $t_{ox}=1.5$ nm, $t_{box}=100$ nm, $t_{Si}=10$ nm, $N_A=3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_D=10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $N_G=2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, iz (16) dobijamo $\lambda = 1.9$ nm, a iz (25) $L_c=33$ nm. Sa sl. 4 naći ćemo vrednost L_c za $N_A=3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $L_c=73$ nm, odatle iz (25) $\lambda=4.3$ nm. Poboljšana kriva sa novom vrednošću za λ je data na sl. 4 punom linijom, za iste parametre SOI MOSFET-a. Vidi se da postoji bolje poklapanje sa numeričkim rezultatima .



Sl. 3. Zavisnost napona praga od dužine kanala. Parametri SOI MOSFET-a su $t_{ox}=1.5$ nm, $t_{box}=100$ nm, $t_{Si}=10$ nm, $N_A=3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_D=10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $N_G=2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.



Sl. 4. Zavisnost kritične dužine kanala od dopiranja aktivne oblasti. Parametri SOI MOSFET-a su $t_{ox}=1.5$ nm, $t_{box}=100$ nm, $t_{Si}=10$ nm, $N_D=10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $N_G=2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

5. MODEL TEMPERATURNE ZAVISNOSTI NAPONA PRAGA

U izrazu za napon praga kod dugokanalnog SOI MOSFET-a potencijali V_{FB} , V_{FBsub} , ϕ_f , zavise od temperature eksplicitno i preko izraza za n_i [6]:

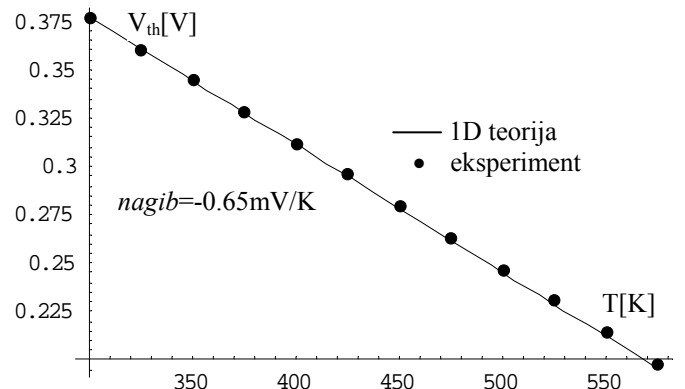
$$n_i(T) = 3.34 \cdot 10^{19} \cdot \left(\frac{T}{300} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{E_g(T)}{2k_s T}} \quad [\text{cm}^{-3}]. \quad (26)$$

Takođe, u izrazu za n_i uračunato je da i energetski procep

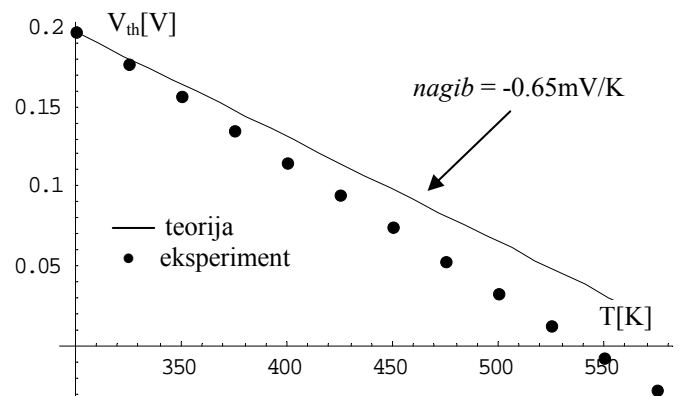
$E_g(T)$ zavisi od temperature [6]:

$$E_g(T) = 1.1875 - 9.025 \cdot 10^{-5} \cdot T - 3.05 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \quad [\text{eV}]. \quad (27)$$

Kada se se ovo zameni u uzraz (11), za parametre SOI MOSFET-a : $t_{ox}=4.5$ nm, $t_{box}=380$ nm, $t_{Si}=40$ nm, $N_A=8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_D=5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $L = 0.3 \mu\text{m}$ dobiće se skoro linearna zavisnost napona praga od temperature (sl. 5). Vrednost napona praga na temperaturi od 300 K je $V_{th} = 0.377$ V, a nagib prave je $nagib = -0.65 \text{ mV/K}$, što daje izuzetno dobro poklapanje sa eksperimentalnim rezultatima [7]. Za veće dužine gejta, od 0.3 do 19.8 μm napon praga na temperaturi 300 K se linearno povećava sa porastom dužine gejta sve do 0.427 V, dok nagib temperature zavisnosti ostaje isti [7]. Na dužini gejta $L=0.2 \mu\text{m}$ vidljiv je efekat kratkog kanala, tj. napon praga će pasti na 0.197 V na temperaturi 300K, dok će nagib temperature zavisnosti pasti na -0.82 mV/K [7]. Smanjenje nagiba nije posledica efekta kratkog kanala jer izračunavanja preko kvazi 2D teorije ne daje pomeranje nagiba prave, sl. 6. Danas se smatra da je temperature zavisnost kod kratkokanalnog SOI MOSFET-a posledica otvaranja zadnjeg kanala na spoju aktivne oblasti i ukopanog oksida. koji postaje provodan pri skraćivanju dužine kanala [7]. Da bi smo procenili ovaj uticaj, vratićemo se na teoriju dugokanalnog SOI MOSFET-a, za slučaj primenjenog velikog napona na zadnjem gejtu tj. podlozi. Sada se umesto (9) dobija izraz u kome se



Sl. 5. Izračunata i izmerena [7] vrednost napona praga u zavisnosti od temperature za SOI MOSFET : $t_{ox}=4.5$ nm, $t_{box}=380$ nm, $t_{Si}=40$ nm, $N_A=8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_D=5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $L = 0.3 \mu\text{m}$



Sl. 6. Poređenje eksperimentalnih [7] i teorijskih rezultata za temperature zavisnost SOI MOSFET-a: $t_{ox}=4.5$ nm, $t_{box}=380$ nm, $t_{Si}=40$ nm, $N_A=8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_D=5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $L = 0.2 \mu\text{m}$.

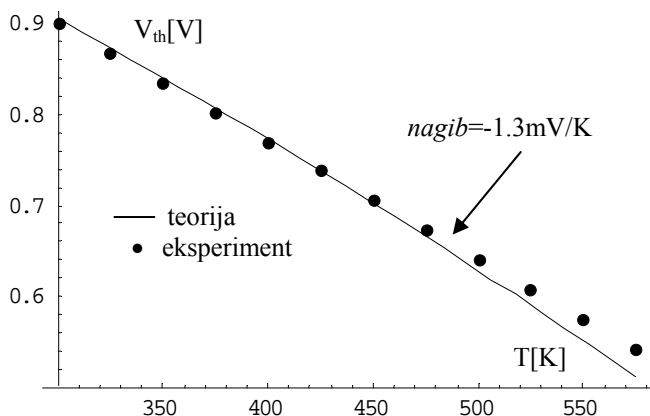
pojavljuje potencijal na zadnjem gejtju ϕ_b :

$$V_G = V_{FB} + \phi_s + \frac{t_{ox}}{t_{box}}(\phi_b - V_{sub} + V_{FBsub}) + \frac{t_{ox}}{\gamma} \frac{qN_A}{\epsilon_{Si}} t_{Si} \quad (28)$$

Ovde ćemo ponovo uzeti da je $\phi_s = 2\phi_f$ na naponu praga, a ϕ_b ćemo izračunati po sledećoj formuli koja se dobija iz (8) i (9):

$$\phi_b = \frac{1}{1 + \frac{t_{box}}{\gamma t_{Si}}} \left[V_{sub} - V_{FBsub} + \frac{t_{box}}{\gamma t_{Si}} \phi_s - \frac{qN_A}{2\gamma\epsilon_{Si}} t_{box} t_{Si} \right]. \quad (29)$$

Član u uglastoj zagradi koji sadrži ϕ_s može se zanemariti u slučaju dovoljno velikog napona na podlozi V_{sub} . Na sl. 7 je data izračunata i izmerena [7] zavisnost napona praga od temperature za dužinu kanala 19.8 μm . Napon na podlozi je $V_{sub} = 80 V$, što osigurava stvaranje provodnog kanala na zadnjem gejtju. Ovakav pristup daje tačno poklapanje sa eksperimentom [7] i pokazuje da je povećanje nagiba temperaturne zavisnosti zaista posledica otvaranja provodnog kanala na zadnjem gejtju.



Sl. 7. Zavisnost napona praga od temperature SOI MOSFET-a: $t_{ox}=4.5 nm$, $t_{box}=380 nm$, $t_{Si}=40 nm$, $N_A=8 \cdot 10^{17} cm^{-3}$, $N_D=5 \cdot 10^{17} cm^{-3}$, $L = 19.8 \mu m$, $V_{sub} = 80V$, teorija i eksperiment [7].

6. ZAKLJUČAK

Data je modifikacija kvazi 2D teorije, u aproksimaciji potpunog osiromašenja na spoju sors-SOI i SOI-drejn. Pri ovome je predpostavljeno da se radi o idealnom prelazu na pn spoju. Ovakav pristup omogućava poboljšanje postojećeg kvazi 2D modela i razvoj jednostavnog modela za opisivanje uticaja realnog pn spoja na strujno naponske karakteristike SOI MOSFET-a. Takođe, razmotren je i efekat temperaturnog uticaja na napon praga sa zadovoljavajućim poklapanjem između teorije i eksperimenta.

LITERATURA

- [1] Vishal P. Trivedi, Jerry G. Fossum, "Scaling Fully Depleted SOI CMOS", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 50, No. 10, November 2003.
- [2] Kunihiro Suzuki, Sergey Pidin, "Short-Channel Single-Gate SOI MOSFET Model", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 50, No. 5, May 2003.
- [3] Srinivasa R. Banna et al., "Threshold Voltage Model for Deep-Submicrometer Fully Depleted SOI MOSFET's", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 42, No. 11, November 1995.
- [4] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, second edition, John Wiley & Sons, New York, 1981.
- [5] R. Ramović, R. Šašić: *Analiza i modelovanje unipolarnih tranzistora malih dimenzija*, DINEX, Beograd, 1999.
- [6] Abhinav Kranti, Subhasis Haldar, R. S. Gupta : "Temperature-dependent treshold voltage analysis of surrounding/cylindrical gate fully depleted thin film SOI MOSFET in the range 77 to 520 K", *Microelectronic Engineering* 49 (1999) 273-286.
- [7] G. Reichert, C. Raynaud, O. Faynot and S. Cristoloveanu: "Submicron SOI MOSFET-s for High Temperature Operation (300-600K)", *Microelectronic Engineering* 36 (1997) 359-362.
- [8] R. Ramović, S. Krijestorac, P. Lukić: "Three-Dimensional Potential Distribution Model in Channel of Small Geometry MOSFET with Gauss Impurity Distribution", *24th International Conference on Microelectronics MIEL 2004, Proceedings*, Vol. 1, pp. 307-310, Niš, Serbia and Montenegro, 16-19 May 2004.

Abstract - Here we give a modification of the well-known quasi-two-dimensional SOI MOSFET model. We apply this model to calculate the short channel effect and temperature dependence of the threshold voltage. A good matching between theory and experiment is obtained.

MODIFICATION OF THE QUASI 2D MODEL FOR SHORT-CHANNEL SOI MOSFET

Milija Sarajlić, Rifat Ramović